



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL
OLEAJE. APLICACIÓN A LA ISLA DE LANZAROTE**

Autor/a

LUCÍA HIDALGO OLEA

Tutor/a

FRANCESC XAVIER GIRONELLA COBOS, AGUSTÍN SÁNCHEZ-ARCILLA CONEJO

Departament

INGENIERÍA HIDRÁULICA, MARÍTIMA Y AMBIENTAL

Intensificació

INGENIERÍA MARÍTIMA

Data

MAIG 2009

Agradecimientos

Agradecer especialmente a...

Agustín, el haberme propuesto esta tesina
Xavi, el haberme ayudado a acabar
Abraham y Pilar, por quedarse conmigo hasta el final
Isabel y Justo, por sus silencios y su arte
Mis padres, por ser como siempre (no cambiéis)
Mis amigos, por meterme caña y creer en mí
Mi misma, por intentarlo una y otra vez

...Una nueva puerta que se abre, porque esta vez sí

Resumen

Análisis del potencial de la energía del oleaje. Caso particular de la Isla de Lanzarote.

Autora: Lucía Hidalgo Olea
Tutores: Xavier Gironella Cobos, Agustín Sánchez-Arcilla Conejo

Los mares y océanos son una gran reserva de energía. Actualmente, el desarrollo tecnológico está haciendo posible que se pueda aprovechar dicha energía de diferentes fuentes: de la amplitud de las mareas, del gradiente térmico oceánico, del gradiente de salinidad, de las corrientes marinas...Concretamente, la energía del oleaje o undimotriz, es el aprovechamiento de la energía que contienen las olas generadas por el viento.

Todas estas fuentes (conocidas como las energías del mar) se caracterizan por su carácter renovable y limpio, y están concebidas para el desarrollo de tecnologías locales que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles y permitan una gestión autónoma, a la larga. Éste es el caso de la Isla de Lanzarote. Durante las últimas décadas, los niveles de consumo energéticos alcanzados por sus habitantes y la cada vez mayor dependencia de los combustibles fósiles, han puesto de manifiesto la necesidad de recurrir a energías alternativas, para el desarrollo sostenible de su civilización.

Entre las diferentes fuentes renovables de las que podría beneficiarse, se encuentra la energía del oleaje con el valor añadido de que dispone de un potencial importante: la isla queda comprendida dentro de las latitudes donde el Océano Atlántico concentra mayor energía.

Para el estudio de su aprovechamiento, el primer paso que se recomienda dar es un análisis de sus disponibilidades energéticas, el cual requiere de diferentes tareas a llevar a cabo.

En la presente tesina se definen cada una de estas tareas a modo de orientación, para la consecuente aplicación a la Isla de Lanzarote.

Se ha evaluado el recurso anual y estacional a partir de los datos energéticos facilitados por el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) de la UPC, pertenecientes a nueve puntos situados alrededor de la isla. Las fuentes de datos utilizadas son las de retroanálisis del oleaje: WANA y SIMAR, durante el período de tiempo entre los años 1958 y 2008.

Con los resultados obtenidos se han confeccionado una serie de mapas de energía que sirvan de base para estudios futuros de la viabilidad energética del oleaje de la isla de Lanzarote.

Finalmente indicar que cuando se trabaja con la energía del oleaje (al igual que con el resto de energías), el objetivo que realmente se persigue es el de la implantación de una planta para su aprovechamiento. Es por ello que habrá que evaluar también la viabilidad económica y la viabilidad técnica de sus instalaciones. Pero esto ya no es motivo de la presente tesina.

Abstract

Analysis of the potential of wave energy. Particular case of the Island of Lanzarote.

Autora: Lucía Hidalgo Olea

Tutores: Xavier Gironella Cobos, Agustín Sánchez-Arcilla Conejo

Oceans and seas are a vast reservoir of energy. Currently, technology development is making it possible to use such energy that comes from various sources such as: the amplitude of oceanic tides, the ocean thermal gradient, the salinity gradient, the ocean currents... Specifically, the wave energy is the use of energy-containing waves generated by the wind.

All these sources (known as the ocean energies) are characterized by the fact that are clean and renewable, and are designed to develop technologies that reduce dependence on fossil fuels and allow for self-management in the long term. This is the case of the Island of Lanzarote. During the past decades, the energy consumption levels achieved by its inhabitants and the increasing dependence on fossil fuels, have emphasized the need of alternative energy for the sustainable development of their civilization.

Among the various renewable sources that could be most beneficial for the island, the wave energy has an added value with an important potential: that the island is comprised within the latitudes where the Atlantic Ocean has more concentrated energy.

For the study of its use, the first recommended step is to analyse its energetic availability, which requires different tasks to do.

In this dissertation, each of these tasks is defined by way of guidance for the consistent application to the Island of Lanzarote.

The seasonal and annual resource from the energy data provided by the Maritime Engineering Laboratory (LIM) of the UPC was studied, belonging to nine locations around the island. The Data sources used are the wave of retroanalysis: WANA and SIMAR between the years 1958 and 2008.

With the obtained results, a series of energy maps were drawn as a basis for future studies about the feasibility of wave energy of the island of Lanzarote.

Finally, it needs to be pointed out that the actual goal of working with wave energy (as with the rest of energies), is to introduce a plant species for its later use. That is why the economic viability and technical feasibility of its facilities also need to be evaluated. But this is no cause for this thesis.

Índice

Capítulo I

Introducción y Objetivos.....	1
-------------------------------	---

Capítulo II

La Energía del Oleaje.....	3
2.1 Contexto energético de la energía del oleaje: las energías del mar.....	3
2.1.1 Energía Mareomotriz	4
2.1.2 Energía Maremotérmica	6
2.1.3 Energía Azul	7
2.1.4 Energía de las Corrientes Marinas.....	8
2.2 Origen de la energía del oleaje.....	9
2.3 Potencial energético	11
2.3.1 Antecedentes.....	13
2.3.2 Clasificación de los dispositivos.....	14
2.3.3 Aspectos clave para el diseño	23
2.4 Ventajas e Inconvenientes	25
2.5 Comparativa entre las Energías del Mar.....	26
2.6 Panorama energético actual.....	30

Capítulo III

Potencial Energético del Oleaje.....	35
3.1 Introducción.....	35
3.2 Cálculo del potencial en el Oleaje Regular	36
3.2.1 Según la Teoría lineal de ondas o de Airy.....	37
3.2.2 Según la teoría no lineal de Stokes de 2º orden	45
3.3 Cálculo del potencial en el Oleaje Irregular	47
3.3.1 Según la descripción estadístico-geométrica del oleaje	47
3.3.2 Según la descripción espectral del oleaje	51

Capítulo IV

Metodología de trabajo.....	57
4.1 Introducción.....	57
4.2 Bases de Datos	60
4.2.1 Definición de la zona de estudio	60
4.2.2 Datos del Oleaje	60

4.3	Clima marítimo	64
4.4	Gestión de los resultados	64

Capítulo V

Aplicación a la Isla de Lanzarote		73
5.1	Antecedentes	73
5.2	Datos de oleaje utilizados.....	74
5.3	Tratamiento de los datos	78
5.4	Resultados	81
5.4.1	Análisis del potencial de la energía del oleaje.....	81
5.4.2	Estudio por direcciones del potencial de la energía del oleaje	87

Capítulo VI

Conclusiones	101
---------------------------	------------

Capítulo VII

Referencias bibliográficas	105
-----------------------------------------	------------

Capítulo I

Introducción y Objetivos

La energía ha sido y es la fuerza impulsora del desarrollo de la humanidad a lo largo de la historia. En la sociedad actual, es la que hace posible poder satisfacer las necesidades vitales asociadas con el hábitat, la industria, el comercio o el transporte.

En el último siglo, el aumento de la población mundial y el uso poco racional que se ha hecho de las reservas energéticas de petróleo y de gas natural, han llevado a la sociedad a enfrentarse con una situación de grave crisis en lo que concierne a la energía. Como es bien sabido por todos, las fuentes de energía tradicionales se están agotando y además, en su aprovechamiento se emiten elevados niveles de contaminación a la atmósfera y a los mares.

Esta situación ha hecho necesaria la búsqueda de alternativas energéticas que permitan continuar satisfaciendo las necesidades de esta sociedad tan dinámica. En consecuencia, surgen las fuentes renovables de energía, basadas en los flujos y ciclos naturales del planeta. A diferencia de las fuentes tradicionales, las fuentes renovables se regeneran y son tan abundantes que perdurarán por cientos o miles de años; además, un uso responsable de ellas no destruye el medio ambiente.

Pero a pesar de esta realidad emergente, el porcentaje que supone el consumo con criterios ecológicos, todavía no es reflejo de una sociedad sostenible. Aun así, los objetivos de este milenio siguen apostando por la producción de energías limpias y por frenar la dependencia de las importaciones energéticas. Para conseguirlo, es imprescindible un decidido impulso desde las instituciones públicas y una sensibilización por parte de todos los usuarios.

Lanzarote es un ejemplo proactivo de ello. La isla cuenta con diferentes recursos naturales como el sol, el viento o las olas; que quiere aprovechar para evitar las consecuencias de un desarrollo insostenible e intentar conseguir la autosuficiencia energética, a la larga.

Concretamente el movimiento de la masa oceánica atlántica alrededor de la franja costera de la isla, alcanza grandes potenciales, atractivos para generar electricidad. Y es que el mar es sin duda una de las fuentes potenciales de energía más grandes que existe, desde el emplazamiento de parques eólicos “off-shore” hasta el aprovechamiento de las mareas, del gradiente térmico oceánico, del gradiente de salinidad, de las corrientes marinas y/o del oleaje.

El principal inconveniente que se le asigna es que su aprovechamiento, en todas sus etapas, resulta todavía muy caro en comparación con otras energías renovables y aún más, en comparación con las energías tradicionales. Por lo que en un contexto global, las energías marinas no resultan (y difícilmente lo harán) energías competitivas, por el momento.

Sin embargo, aplicadas de manera socialmente responsable, pueden ofrecer oportunidades de empleo en zonas rurales y urbanas y promover el desarrollo de tecnologías locales. Éste es el caso de las zonas costeras e islas, y concretamente el de la Isla de Lanzarote.

Pero quizás el verdadero obstáculo reside en que todavía existe un gran desconocimiento, acerca de las energías marinas, por parte de los profesionales del sector. Es por ello que la tecnología desarrollada hasta ahora, se encuentra en fase de experimentación y que hacen falta más estudios de análisis y viabilidad energética que avalen su eficiencia, y optimicen su rendimiento.

En consecuencia surge la presente tesina, la cual tiene como objetivo final, el analizar el potencial de la energía del oleaje de un caso particular: la Isla de Lanzarote.

Para ello se ha estructurado el trabajo en cuatro capítulos diferenciados, con los siguientes objetivos específicos:

1. Definir las energías del mar en lo referente a: su origen, su potencial, el estado del arte, sus inconvenientes y ventajas y el papel que desempeñan en el panorama energético actual; para su conocimiento e introducción de la energía del oleaje.
2. Definir las diferentes teorías existentes para la formulación del potencial de la energía del oleaje, y establecer una comparativa entre los resultados que aportan cada una de ellas, para escoger con criterio aquella que mejor se adecue al fenómeno energético.
3. Definir la metodología de trabajo que hay que llevar a cabo, en función de los datos disponibles, para analizar el potencial de la energía del oleaje en una zona concreta.
4. Aplicación de la metodología de trabajo a la Isla de Lanzarote para la confección de un mapa de energía.

Capítulo II

La Energía del Oleaje

2.1 Contexto energético de la energía del oleaje: las energías del mar

Tres cuartas partes de la superficie terrestre están ocupadas por el agua marina. Esto es lo que se conoce de manera genérica con el nombre de océanos.

Los océanos se caracterizan por estar formados por volúmenes de agua a diferentes profundidades, con composición y temperaturas variables. Dicho fenómeno se denomina “masa de agua” y se dice que ésta se halla establemente estratificada.

La génesis de la energía contenida en el mar proviene de diferentes fuentes, ya que la circulación oceánica es un fenómeno complejo en el que intervienen varios factores como: el campo gravitatorio, la rotación de la Tierra, la fricción, la presión atmosférica, la densidad, la profundidad y el calentamiento de las masas de agua.

Existe la influencia gravitacional de los astros (el Sol y la Luna) sobre las partículas líquidas de los océanos, que provoca movimientos oscilatorios del nivel del mar: las mareas. La energía primaria proveniente de estas transformaciones es mecánica, en sus formas cinética y potencial.

Por otra parte, el mar como almacén de energía en forma de calor, retiene una parte de la energía calorífica que le llega con la radiación solar, creándose una diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo, conocido como gradiente térmico oceánico.

Otra fuente de energía de los océanos que suscita gran interés, lo constituye el gradiente de salinidad. Igualmente el sulfuro de hidrógeno, gas combustible de elevado valor calórico; y un grupo de algas distribuidas en más de un tercio del océano, que se considera una biomasa de la que se puede obtener gases combustibles, como metano y etano.

Además, cuando el viento actúa sobre el agua del mar, le transmite la energía necesaria para ponerlo en movimiento, produciendo las ondulaciones, en las capas superficiales que constituyen el oleaje que se observa en todas las aguas de los océanos y que golpean las costas de los continentes.

Finalmente, la combinación de algunos de los fenómenos anteriores, como la influencia de las mareas y la diferencia de densidad, da lugar a las corrientes marinas oceánicas, de las cuales puede aprovecharse la energía cinética que éstas generan al trasladarse.

La tecnología existente en la actualidad está haciendo posible que la sociedad se pueda proveer de la energía del mar, en las siguientes formas:

Tabla II.1 Relación de las energías del mar existentes en la actualidad.

Energía	Fuente de Energía
Energía Mareomotriz	Mareas
Energía Maremotérmica	Gradiente térmico oceánico
Energía Azul	Gradiente de salinidad
Energía de las Corrientes Marinas	Corrientes marinas
Energía Undimotriz	Olas de viento

Dentro de la clasificación energética, las energías del mar están consideradas como “energías renovables y limpias”.

Se les denomina renovables porque, al estar basadas en los flujos y ciclos naturales del planeta (sol, viento, agua...), tienen la capacidad de regenerarse y son tan abundantes que la fuente de energía primaria no se agota por su explotación.

La cualidad de limpias se debe a que en la transformación energética no se producen subproductos contaminantes gaseosos, líquidos o sólidos. Además, un uso responsable de éstas produce un impacto reducido al medio ambiente.

Estos dos aspectos representan las ventajas más atractivas de las energías del mar, teniendo en cuenta el panorama energético actual. De todas maneras, existen también otras ventajas y una serie de inconvenientes, específicos de cada una de ellas; que hay que tener en cuenta a la hora de evaluar su viabilidad y durante su desarrollo.

En este capítulo se introduce la energía del oleaje, dentro del contexto energético de las energías del mar, definiendo de cada una de éstas los aspectos más significativos que permitan tener un conocimiento básico pero ya con criterio para poder establecer una comparativa entre todas ellas.

2.1.1 Energía Mareomotriz

La energía mareomotriz es el aprovechamiento de la energía liberada por el agua de mar en sus movimientos de ascenso y descenso de las mareas.

El comportamiento de las mareas y el desnivel de las mismas dependen de diferentes factores: de la posición relativa de la Tierra, el Sol y la Luna, de la proporción mares-tierra, de su distribución geográfica, de la topografía local, de la profundidad de las cuencas oceánicas y de los fenómenos meteorológicos.

En la mayoría de las costas del mundo se producen dos mareas altas y dos mareas bajas, cada día. La amplitud de las mareas, es decir, la diferencia entre los niveles más alto (pleamar) y más bajo (bajamar), suele ser pequeña en medio del océano, pero en determinados puntos del globo terráqueo puede alcanzar hasta los 20 metros, como en el caso de la Bahía de Fundy (Canadá).

Según Herman, W. (2005), la potencia total media asociada a éstas se estima del orden de 3.7 TW.

Sin embargo, el mismo indica que para el aprovechamiento eficaz de la energía mareomotriz es necesario que la amplitud de las mareas sea al menos de 5 metros y que

exista una bahía apropiada para la recogida y almacenamiento del agua en las pleamares

Estas condiciones se reúnen en pocos lugares del mundo, de manera que la potencia disponible en las costas se reduce a valores del orden de 1 TW, y teniendo en cuenta que el rendimiento de las centrales mareomotrices no supera el 25%, la potencia mareomotriz económicamente viable (aprovechable) se cifra alrededor de los 15 GW.

El aprovechamiento de la energía de las mareas consiste en la extracción de la energía de la subida y bajada de las mareas, utilizando turbinas localizadas en conductos que atraviesan unos diques (figura II.1).

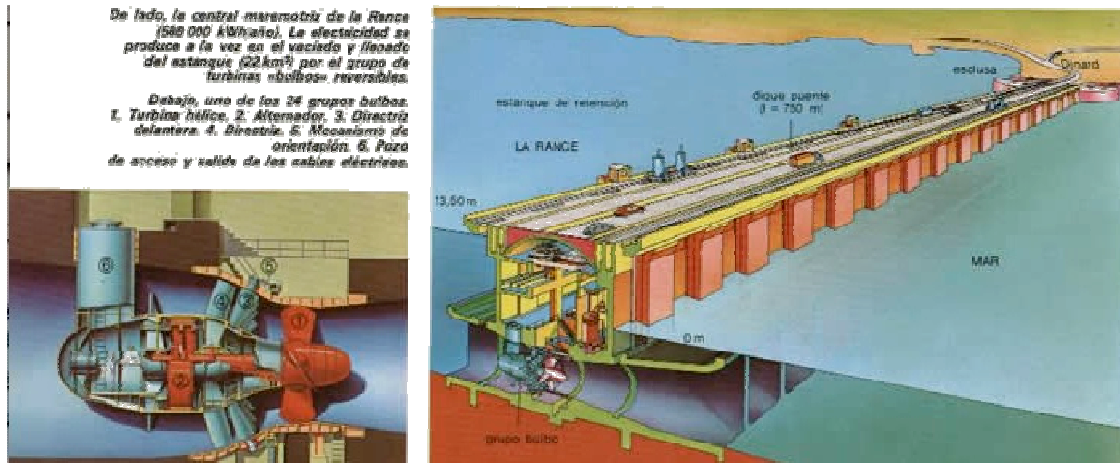


Figura II.1 Esquema en alzado de la central mareomotriz de La Rance (Francia).

Quando sube la marea, los diques recogen el agua y lo retienen mediante compuertas hasta la bajamar. La energía potencial originada por la diferencia del nivel del agua, se convierte en energía cinética debido al rápido movimiento del agua al pasar a través de las turbinas. Las palas de las turbinas, al girar, convierten la energía cinética del agua en mecánica de rotación, la cual permite accionar un generador para producir electricidad.

La ubicación de los diques ha de ser en estuarios adecuados, ya que a menor amplitud de mareas, es necesario disponer de volúmenes de agua mayores, y por lo tanto, se precisa de grandes desarrollos en la longitud de los diques.

Las principales ventajas de la energía mareomotriz son las referentes a su carácter de energía renovable y limpia. La ventaja propia de su fuente de energía es que al tratarse de un fenómeno regular, es fácilmente predecible.

En cuanto a los obstáculos para su explotación, anteriormente se comentó que se trata de una energía con un potencial limitado, condicionado en parte por la necesidad de localización puntual.

Esto se agrava con el hecho de que el coste de las instalaciones mareomotrices es relativamente alto, en relación a la energía producida. De manera que se requiere mucho tiempo para recuperar el valor de la inversión. Esto se debe a que el periodo durante el cual se puede generar energía es menor que el de un sistema convencional, lo que supone que se tenga que invertir en equipos de gran capacidad que sólo se usan intermitentemente.

Por otro lado, la implantación de la energía mareomotriz conlleva a una modificación importante del paisaje, debido a que las centrales requieren de gran espacio; que puede

producir un impacto ambiental negativo en los ecosistemas ricos, como son las marismas y los estuarios.

2.1.2 Energía Maremotérmica

La energía maremotérmica surge del aprovechamiento del gradiente térmico oceánico.

Éste se origina a partir de la diferencia de temperaturas que se da en ciertas masas de agua sometidas a unas condiciones determinadas.

La radiación solar penetra en el mar, alcanzando generalmente una profundidad promedio de cien metros, que puede propagarse hasta los mil metros. Esto da lugar a que el agua almacene una importante cantidad de energía calorífica. Conforme se profundiza en el mar, la intensidad de la radiación decrece, por lo que la temperatura disminuye. La diferencia de temperaturas entre la capa superior (caliente) y la capa inferior (fría) se encuentra en el intervalo de 10°C a 25°C.

En determinadas condiciones atmosféricas, bajas latitudes y profundidades menores de 1000 metros, dicha diferencia de temperaturas es la que origina el gradiente térmico oceánico.

Se estima que, en un año, la energía solar absorbida por los océanos es de al menos 4.000 veces la energía que actualmente consume la humanidad.

Sin embargo, Herman, W. (2005) comenta en una de sus ponencias referentes a las energías renovables, que para el aprovechamiento de la energía maremotérmica se requiere que el gradiente térmico sea de al menos 20°C. Las zonas del mundo térmicamente favorables se corresponden con las regiones ecuatoriales y subtropicales.

Además, existen otros factores que influyen de manera decisiva en la elección del emplazamiento: las condiciones marinas, las condiciones meteorológicas, las condiciones tecnológicas, etc...De manera que el rendimiento termodinámico de las instalaciones es bastante bajo, si se compara con el de una central convencional. En el supuesto de utilizar un emplazamiento de condiciones muy favorables, se obtiene sólo un rendimiento del 8,6%.



Figura II.2 De izquierda a derecha: central maremotérmica flotante proyectada por la empresa Lockheed, central Mini-OTEC en barcaza y planta maremotérmica experimental en tierra firme, en Hawái.

El aprovechamiento de los gradientes térmicos se lleva a cabo en las plantas maremotérmicas, las cuales pueden estar ubicadas en diferentes dominios: en tierra firme o en zonas cercanas a la costa, en plantas montadas en plataformas, y en instalaciones

flotantes o amarradas en aguas profundas. Todos estos entornos han de tener en común la cualidad de estables, para lograr una eficiente operación del sistema.

El proceso de producción de electricidad consiste en la utilización de una máquina térmica que, cualitativamente, operaría de forma idéntica a una central térmica convencional. El agua caliente de la capa superior oceánica actúa como fuente de calor, mientras que el agua extraída de las profundidades actúa como refrigerante.

Una gran ventaja de este procedimiento es la reutilización de la salida de agua (agua fría) en diversos usos adicionales: acondicionamiento de aire de edificios, alimentación de peces, crustáceos, algas marinas... Esta agua puede ser también potabilizada, de manera que constituye un valor añadido para su implantación, en islas donde el agua potable escasea.

Sin embargo, esta polivalencia todavía no sufraga los altos costes económicos que suponen, tanto la construcción de las plantas maremotérmicas, como su explotación y consumo de la electricidad producida. De manera que todavía sigue siendo más fácil recurrir a las centrales térmicas convencionales.

2.1.3 Energía Azul

La energía azul consiste en el aprovechamiento de la energía que se libera cuando entran en contacto dos masas de aguas con diferente salinidad.

Concretamente, en las desembocaduras de los ríos al mar, el agua dulce procedente de los ríos se mezcla con el agua salada de los océanos. Debido a las diferencias de su presión osmótica, se origina un gradiente salino, acompañado de un flujo neto de agua dulce hacia el lado de agua salada que produce un incremento de la columna de agua (presión) del agua salada; y de ahí que se genere esta energía.

El proceso para la obtención y la transformación de la energía osmótica se denomina presión osmótica retrasada (PRO). Éste consiste en mezclar el agua dulce con el agua salada, manteniendo controlada la presión del lado del agua salada.

Previamente se realiza la captación de ambos fluidos mediante dispositivos independientes. El agua de mar es bombeada desde el mar e introducida en unas membranas, donde se diluye con el agua dulce que entra a través de las membranas. El agua dulce es introducida en la planta y es conducida hasta el módulo de las membranas. Allí, el agua dulce es transferida por ósmosis a través de las membranas dentro del agua de mar que se encuentra a presión. El proceso osmótico incrementa el flujo de agua a alta presión y ésta es la principal transferencia de energía en la planta.

La energía azul es todavía una energía muy reciente. De hecho, tal y como lo argumenta Villate, J.L. (2008) en un reportaje de la revista Física y sociedad, en la actualidad sólo existen dos plantas que son piloto (una en Noruega y otra en los Países Bajos), con un rendimiento de 2 y 3 W/m² de membrana. Y para que esta tecnología sea interesante, desde el punto de vista comercial e industrial, se debe lograr un rendimiento de al menos 5 W/m² de membrana. Es por ello que se considera que la energía azul no será competitiva hasta dentro de 5 o 10 años.

Por otro lado, fuentes externas estiman que si se implantaran plantas de energía azul en todas las desembocaduras, se cubriría el 20% de las necesidades energéticas mundiales; ya que la tendencia es poder conseguir que la mitad de la energía teórica pueda ser transformada en energía eléctrica.

Las principales ventajas de la energía azul derivan de la ubicación de las plantas y por lo tanto pueden preverse en el diseño de su instalación. Debido a que muchos ríos desembocan en zonas costeras de ciudades urbanizadas o zonas industriales, no existe la necesidad de construir grandes plantas de energía en áreas despobladas, para suministrar electricidad a la población. Por otro lado, las plantas de energía pueden ser construidas parcial o completamente bajo tierra, evitando afectar la calidad del entorno local.

Recordar que se trata de una energía limpia y renovable. Y además es estable y predecible: la diferencia de salinidad entre el agua de los océanos y el agua de los ríos se mantiene esencialmente por la evaporación del agua de los océanos y por la lluvia recibida por los ríos.

El principal inconveniente se debe a los altos costes que supone la fabricación de las membranas que, al tratarse de una tecnología no muy desarrollada, presentan una baja eficiencia. De manera que aumentar la capacidad de producción hasta el mínimo umbral requerido, todavía no es viable económicamente.

2.1.4 Energía de las Corrientes Marinas

La energía de las corrientes marinas es el aprovechamiento de la energía cinética que se genera en determinadas masas de agua, al trasladarse de manera continuada y permanente, a través los océanos. La circulación de estas masas de agua se debe a las diferencias de densidad (condicionadas por la salinidad y la temperatura) y a la influencia de las mareas.

Ibáñez, P. (2008) indica que el potencial total estimable es de 5 TW.

Sin embargo, existen unos requisitos básicos para que la generación de energía eléctrica sea costo-efectiva: se necesita una velocidad de pico promedio de las corrientes superior a 2,25-2,5 m/seg., y una profundidad de entre 20-30 metros. De manera que el potencial aprovechable estimado es de 30 GW.

Las técnicas existentes para el aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas son similares a las que se utilizan para el aprovechamiento de la energía eólica: consisten en un rotor de una turbina que va montado en una estructura, pero en este caso, la instalación se sumerge de manera que el rotor quede a una profundidad adecuada para poder aprovechar la zona de velocidades máximas de la masa de agua.

Los rotores pueden ser axiales (tipo hélice, de eje horizontal) o de flujo cruzado (tipo Giromill, de eje vertical).

La ubicación de las turbinas presenta flexibilidad: se pueden colocar directamente sobre el lecho marino previamente arreglado (aguas poco profundas), o sobre un sistema flotante con los convenientes fondeos (aguas poco profundas y profundas) (figura II.3).

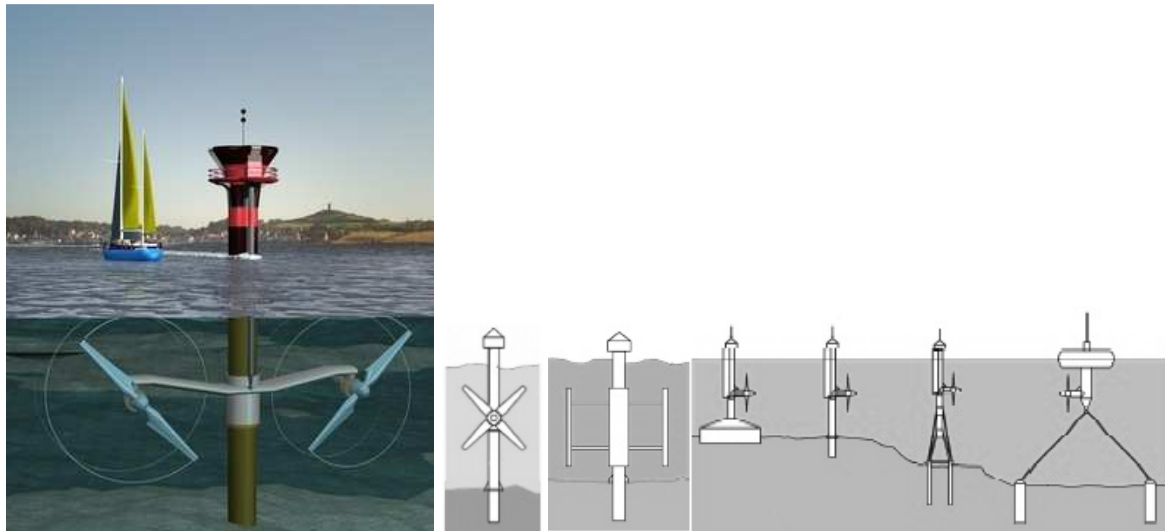


Figura II.3 Detalle de la turbina Sea Gen y esquema de los diferentes tipos de turbinas, en función del rotor y de la tecnología. Fuente: www.marineturbines.com

2.2 Origen de la energía del oleaje

Existen diferentes tipos de manifestaciones ondulatorias en el océano, en función de la perturbación que las causa: acción del viento, terremotos y tormentas, el sol y la luna...Concretamente, la energía del oleaje, denominada también “energía undimotriz”, es el aprovechamiento de la energía que contienen las olas generadas por el viento (olas más comunes y de mayor densidad energética), que corresponden al movimiento ondulatorio de longitud corta.

En realidad, el mecanismo de formación de las olas debidas al viento no está aun perfectamente esclarecido, aunque se asocia a la respuesta de la superficie de la masa de agua, a la acción de éste.

Parte de la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, y concretamente sobre los océanos, calientan el aire. Este fenómeno del calentamiento solar se distribuye de manera desigual, dando lugar a una variación de temperatura en la fase aérea que genera unas diferencias de presión atmosférica, causando el desplazamiento horizontal de la masa de aire: el viento.

Cuando el viento sopla a través de la superficie del mar, las moléculas de aire interactúan con las moléculas de agua que están en contacto. La fuerza que se genera entre el aire y el agua modifica la superficie del océano, dando lugar a pequeños rizos, conocidos como olas de capilaridad. La generación de estos rizos, asociados con los cambios de dirección de la superficie de la masa de agua, da lugar a una mayor superficie de contacto, incrementándose la fricción entre el agua y el viento. Ello da lugar al crecimiento de las olas que, cuando han alcanzado un cierto tamaño, facilitan que el viento pueda ejercer una mayor presión sobre ellas con el consiguiente incremento de las mismas.

Es por esto que se dice que las olas son un derivado terciario de la energía solar. Es decir (figura II.4):

Sol → Viento → Oleaje

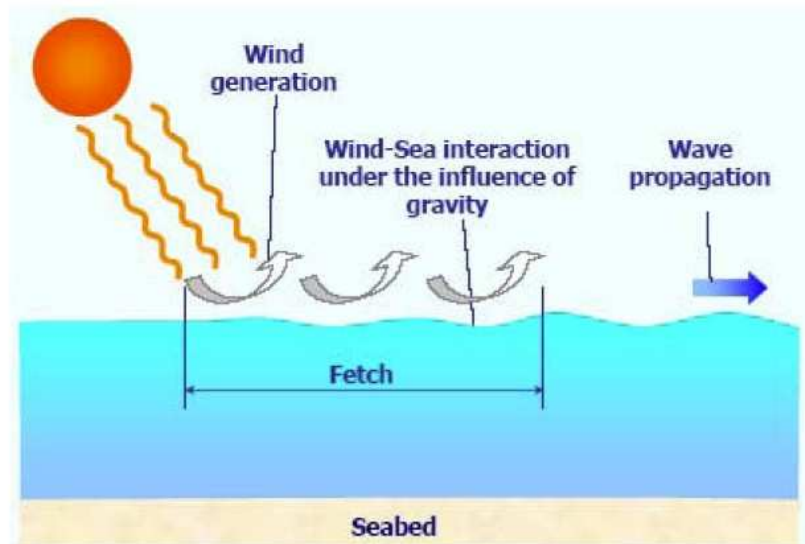


Figura II.4 Esquema del origen de la energía del oleaje. Fuente: Fernández, J. (2008)

El tamaño de las olas generadas por un campo de viento depende de tres factores:

- La *intensidad*: la velocidad del viento.
- La *duración*: el tiempo durante el cual el viento está soplando.
- El *fetch*: la distancia o alcance sobre la cual la energía del viento se transfiere al océano para formar las olas.

De todas maneras, hay que tener en cuenta que las olas no crecen indefinidamente, aunque aumente el fetch o el tiempo que sopla el viento. Sino que la altura de las mismas alcanza un equilibrio.

Es decir, para una velocidad dada del viento, la energía de la ola puede estar limitada por el alcance o por la duración del mismo. Existe un alcance y duración mínima, para una velocidad del viento dada, en que la energía que adquiere el océano se equilibra con la energía que se pierde, básicamente por rotura de la cresta de la ola, obteniéndose lo que se denomina un *océano en completo desarrollo*.

El oleaje que se presenta en el área de generación o cerca de ésta, se denomina *mar de viento*. Éste se caracteriza por ser irregular, con crestas de pequeña longitud y gran variedad de direcciones de avance; dando lugar a una superficie líquida caótica sin frentes de crestas bien definidos y sin ninguna periodicidad.

A medida que las olas se alejan del área de generación, sufren una pérdida de energía, una dispersión angular y radial y la soldadura entre ellas, de manera que el oleaje se hace cada vez más regular. Se forman grandes frentes de crestas y aparecen direcciones predominantes y ritmicidad en el fenómeno. Ahora el oleaje se denomina *mar de fondo*.

El oleaje también puede clasificarse en función de la profundidad relativa en la que se desplazan las ondas, representada como h/L , siendo "h" la distancia en vertical desde el fondo hasta el nivel del agua en reposo y "L" la longitud de la onda.

Atendiendo a esto, se definen tres dominios diferentes:

- Oleaje en aguas profundas ($\frac{h}{L} > \frac{1}{2}$)

- Oleaje en aguas intermedias ($\frac{1}{25} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$)
- Oleaje en aguas someras ($\frac{h}{L} < \frac{1}{25}$)

El primer dominio se caracteriza porque el efecto del fondo sobre el oleaje, es nulo. En el segundo, la acción del fondo comienza a sentirse, dando lugar a una transformación gradual en la forma del perfil superficial. Finalmente, en el tercero se produce una transformación brusca de la ola, su rotura y la generación de distintos tipos de sistemas de corrientes costeras.

Un aspecto muy atractivo durante el fenómeno de propagación del oleaje, es que las olas pueden viajar grandes distancias (incluso a miles de kilómetros del punto donde se originaron) con pequeñas pérdidas energéticas. Estas pérdidas se deben mayoritariamente a los fenómenos de propagación del oleaje, que son los causantes de modificar las características de la ola, a medida que éstas se acercan a la costa.

Éstos son: el fenómeno de *refracción*, debido a la interacción de las olas con el fondo durante su avance; y los fenómenos de *reflexión* y de *difracción*, producidos por la interacción del oleaje con un obstáculo.

Por otro lado, el conocimiento y la valoración del impacto de estos fenómenos en la zona de captación de la energía, puede aprovecharse para el control y la concentración del oleaje, compensando las pérdidas energéticas.

Es decir, interesa poder localizar geográficamente los puntos favorables para la generación de energía undimotriz.

2.3 Potencial energético

Según el proyecto GCEP de la Universidad de Stanford, la potencia solar total absorbida por la Tierra es de 375 W/m^2 , de la cual el 75% genera los vientos que a su vez transfieren el 40% de su energía a las masas oceánicas.

Por lo tanto, la energía del sol que se transmite al oleaje se puede estimar como:

$$0,75\% \cdot 40\% \cdot 375\% = 1 \text{ W/m}^2$$

Teniendo en cuenta que la superficie total de la franja costera es de 336.000 Km, los recursos globales de la energía de las olas se estiman en aproximadamente 3,5 TW.

Al igual que las anteriores energías del mar, este potencial queda repartido en el planeta de forma desigual (figura II.5).

La zonas oceánicas expuestas a los vientos regulares son las que presentan un mayor potencial energético: entre 50-100 kW por metro de frente de ola, y se encuentran entre las latitudes 40° y 65° de los Océanos Atlántico y Pacífico. Por el contrario, las zonas tropicales son las que presentan un potencial energético menor, que oscila entre los 10 y 20 kW/m. La media es del orden de 8 kW/m.

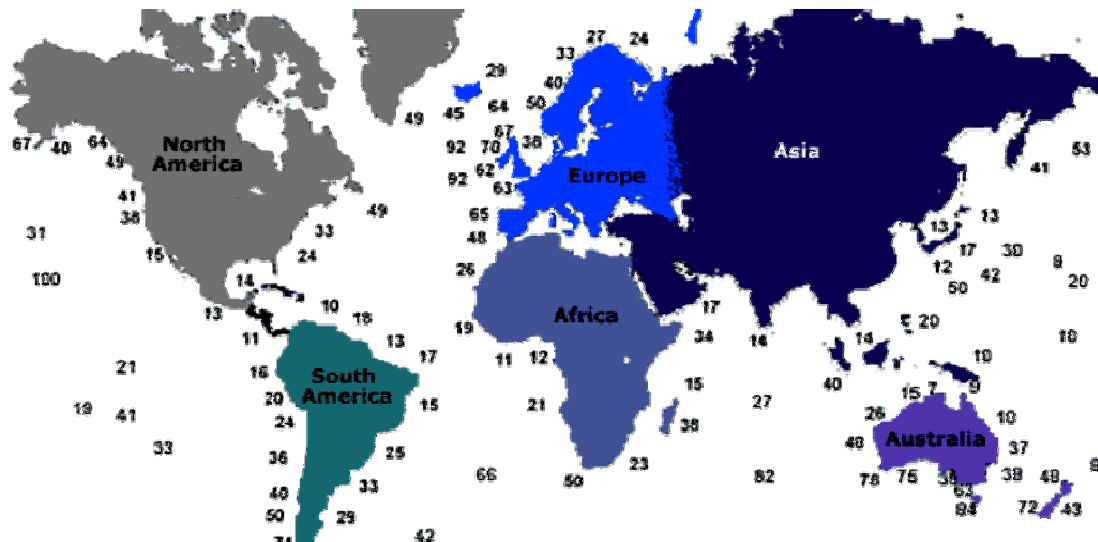


Figura II.5 Mapa mundial mostrando el potencial medio de energía del oleaje, en KW/metro de frente de ola. *Fuente: Ruiz, J.P. (2007)*

En el caso de la franja costera española, en 1979 el Ministerio de Industria y Energía estimó el potencial energético en 37.650 MW aproximadamente: 25 kW/m en la franja costera bañada por el Océano Atlántico y 11 kW/m en la franja costera bañada por el Mar Mediterráneo. La costa Cantábrica y las Islas Canarias son las regiones con mayor potencial energético, situadas según la clasificación INRI (Independent Natural Resource Index) como la 2ª o 3ª ubicación con mayor potencial del mundo (en Europa sólo son superadas por los Países Nórdicos y el Reino Unido).

Ante esta valoración, un aspecto muy importante a tener en cuenta es que no siempre las zonas de mayor potencial energético resultan ser las más eficientes, ya que generalmente están asociadas con temporales devastadores, que podrían llegar a destruir las instalaciones para la generación de electricidad.

Cuando se escoge una zona potencial, han de tenerse en cuenta una serie de fenómenos asociados a la propagación del oleaje:

- *En cuanto a la profundidad* a la que el dispositivo debe sumergirse para captar la energía máxima. Se supone que la energía captada es máxima si el dispositivo es capaz de interceptar todos los movimientos de una ola, es decir, desde la superficie hasta el fondo. Sin embargo, se sabe que a partir de una cierta profundidad, la cantidad de energía que contiene el fondo es tan pequeña; que no resulta viable captarla, ni económica ni técnicamente.
- *En cuanto a la ubicación* idónea del dispositivo, siempre es preferible disponer de las instalaciones lo más cerca posible de la zona de costa, para facilitar su operatividad. Sin embargo, en la mayoría de las zonas costeras del mundo las aguas son poco profundas, y cuando la ola se acerca a éstas va perdiendo gradualmente su potencia, debido al efecto del fondo del mar.
- Además, cuando las olas llegan a la playas se rompen, son turbulentas y disipan energía, pudiendo ser dañinas para los aparatos encargados de captar su energía.
- Es por ello que los lugares preferidos son aquellos donde la línea de costa está constituida por acantilados bañados por aguas profundas.

- Tecnología de captación de la energía del oleaje

2.3.1 Antecedentes

A pesar de que los expertos de la energía del oleaje alegan de que se trata de una energía muy reciente (al igual que las anteriores energías del mar) y en consecuencia, poco desarrollada todavía, los primeros testimonios de su utilización se remontan al siglo XIII, en la China, donde utilizaban la energía del oleaje para hacer funcionar a los molinos.

Cinco siglos después se estudia por primera vez la posibilidad de obtener energía de las olas: la primera patente, perteneciente a unos franceses parisinos, data de 1799. Ésta consistía en una balsa forzada a movimientos verticales, de ascenso y descenso, conectados a algún aparato de la orilla por numerosos alambres y poleas. Dicho mecanismo y su sistema de funcionamiento podría asimilarse a las boyas actuales.

Posteriormente, en 1910, aparece la primera generación con éxito de energía eléctrica (1 kW) pertenece a Bochaux-Praceique. Ésta consiste en el diseño de un sistema hidroneumático para dar electricidad a su casa de Rayon (figura II.6).

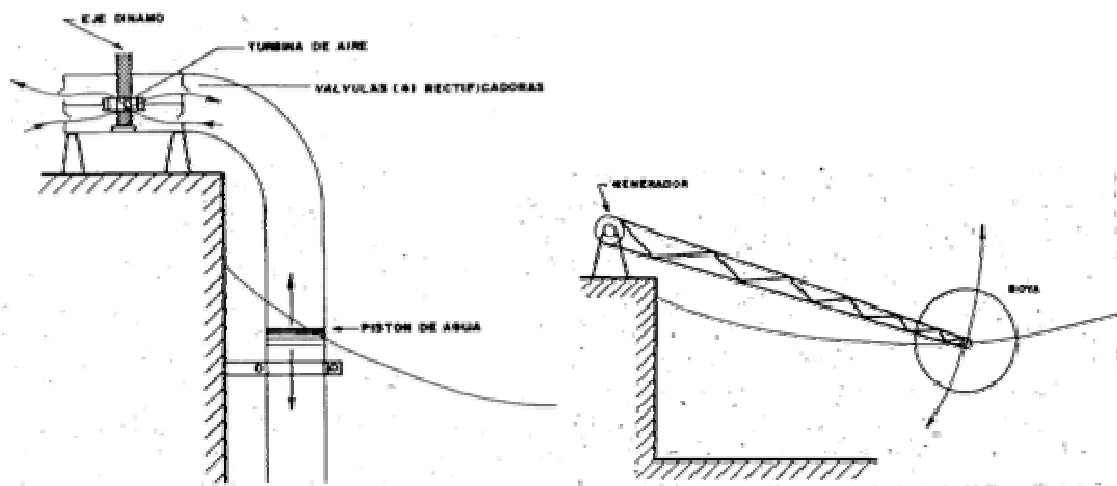


Figura II.6 Esquema de la patente de Girard (izda.) y del sistema de Bochaux-Praceique (dcha.).
Fuente: Vidal, C. (1986a)

En un resumen histórico realizado por Vidal, C. (1986a), se indica que por entonces, el ritmo de presentación de patentes sobre este tema era de alrededor de seis por año. Más tarde, entre 1930 y 1970, el incremento disminuye debido a la utilización masiva del petróleo para la producción de energía. Según Mc. Cormick, M.E. (1981) aparecieron alrededor de unas 1000 patentes mundiales de generadores energéticos de olas,

A partir del 1975, los gobiernos comienzan a apoyar a Universidades y Laboratorios para el estudio del aprovechamiento de la energía del oleaje, con vistas a la producción eléctrica.

Finalmente, es a partir de los años 90 cuando un cierto número de empresas de varios lugares del mundo, comienzan a involucrarse en el diseño y desarrollo de aparatos para el aprovechamiento de la energía de las olas. Los principales países promotores son: Japón, Australia, Países Bajos, Reino Unido, Dinamarca, E.E.U.U. y Canadá. Años después se añadirán también: China, Indonesia, Maldivas, Portugal, Grecia, Irlanda, España, Noruega, Suecia y Finlandia.

Actualmente la tecnología de captación está todavía en fase de desarrollo con diferentes proyectos de demostración: existe una treintena de aparatos pilotos que están produciendo electricidad, de forma aislada o conectada a la red, en claro contraste con cualquier otro tipo de aprovechamiento de energía renovable.

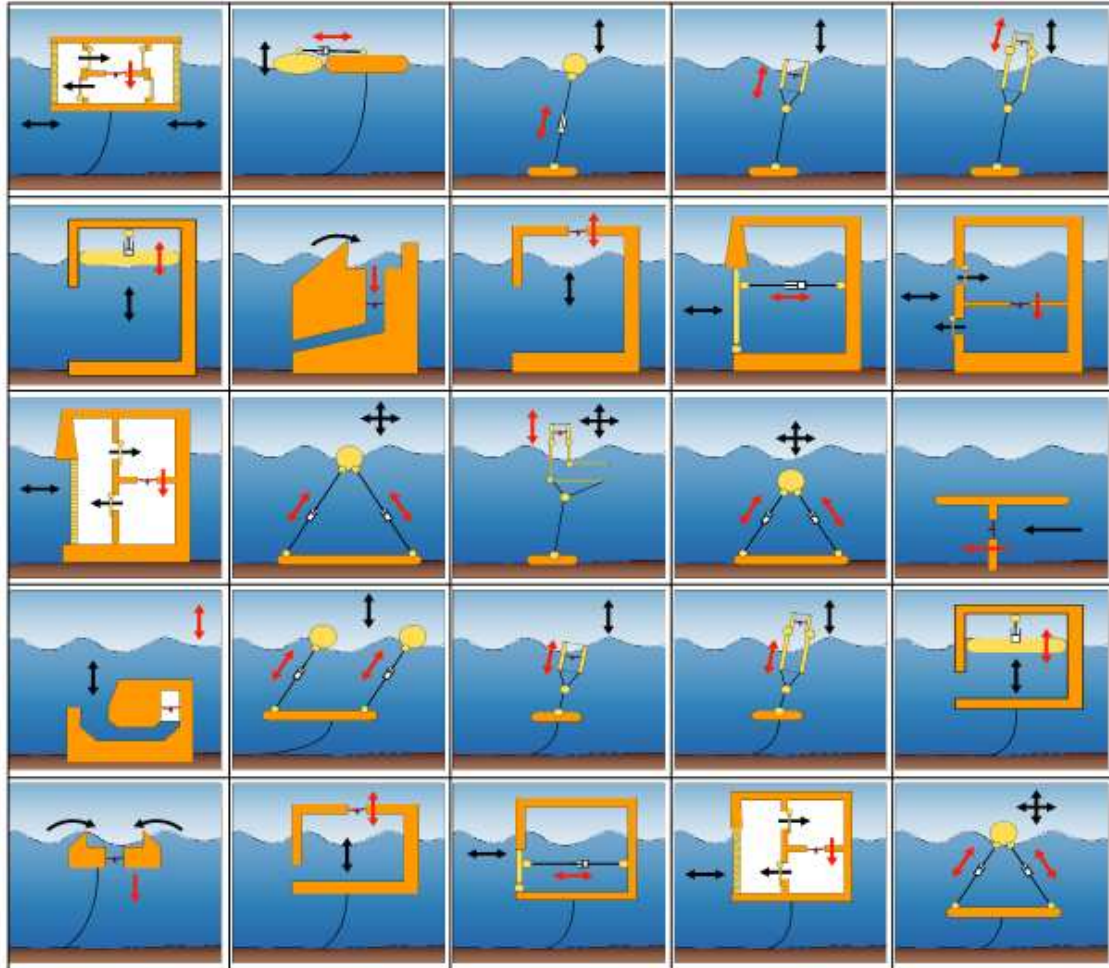


Figura II.7 Esquema de los diferentes dispositivos existentes para el aprovechamiento de la energía del oleaje.

Además, el pasado mes de septiembre del 2008, diferentes medios de comunicación, informaron de la aparición de la primera planta en fase comercial de todo el mundo, ubicada en la costa norte de Portugal.

2.3.2 Clasificación de los dispositivos

Las diferentes intervenciones a lo largo de la historia en concepto de la energía de las olas, ha sido divergente dando lugar a una tecnología muy dispar. En la actualidad coexisten diferentes sistemas de captación. Asimismo, existen varios criterios para clasificar dichos dispositivos, el número de los cuales se va ampliando a medida que evoluciona la tecnología y surgen nuevas soluciones capaces de adaptarse a nuevos retos.

Fernández, J. (2008), en su tesina de especialidad, hace una revisión y un compendio de los criterios utilizados por diversos autores destacables en el ámbito de la energía del oleaje.

La siguiente clasificación se ha confeccionado en base a los aspectos que menciona Fernández, J. (2008) y se ha complementado con la información que ofrecen al respecto: el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC), la Asociación Europea de Energía Oceánica (UE-OEA) y otras fuentes que se indicarán en su correspondiente apartado.

2.3.2.1 Según la posición relativa de los dispositivos respecto a la costa

Instalaciones ubicadas en la costa (offshore). Los sistemas de costa se caracterizan por estar fijados en la propia costa: suelen construirse sobre rocas a las que se deben fijar bien para resistir tempestades. Esto tiene la ventaja de que se facilita la instalación y el mantenimiento, además de que no necesitan sistemas de anclaje al fondo marino. Pero también presentan unos inconvenientes: cuentan con un número reducido de lugares costeros donde se pueden instalar y capturan mucho menos energía que los aparatos flotantes (instalados lejos de la costa), debido a que las olas en aguas profundas disponen de más energía que las olas en aguas más cercanas a la costa.

Sin embargo, la pérdida de potencial energético en la costa puede ser compensada por procesos naturales de concentración de la energía (como la refracción y la difracción), siempre que el dispositivo esté instalado para tal fin.

Los dispositivos que se instalan en la costa incluyen: las *columnas oscilantes de agua* (OWC, *Oscillating Water Column*), los *canales ahusados* (Tapchan).



Figura II.8 Detalle del dispositivo captador OWC "Pico" (Azores). Fuente: www.pico-owc.net

Instalaciones ubicadas en aguas someras o cerca de la costa (near-shore). Incluye las instalaciones ubicadas a una distancia máxima de 500 metros de la costa, donde las profundidades oscilan entre los 10 y 40 metros.

Estos dispositivos cuentan con la mayoría de las ventajas que los dispositivos ubicados en la costa, pero con el valor añadido de que se exponen a mayores potenciales energéticos. Igualmente también cuentan con el inconveniente de que producen un impacto negativo en la zona costera.

Dentro de los dispositivos que se instalan cerca de la costa se encuentran: las columnas oscilantes de agua (OWC, *Oscillating Water Column*) y las boyas.

Instalaciones ubicadas en aguas profundas o en alta mar (shoreline). Estas instalaciones se encuentran ya suficientemente alejadas de la costa, profundidades

superiores a los 50 metros, de manera que la accesibilidad, el mantenimiento y el transporte de energía se complican. Sin embargo, estos dominios no quedan descartados ya que son los que disponen de mayores potenciales energéticos.

Otra manera de denominar a los dispositivos *shoreline*, *near-shore* y *offshore*; es mediante la siguiente clasificación, también en función de la ubicación respecto a la costa:

Dispositivos de primera generación. Incluye los dispositivos *shoreline*, los cuales se encuentran apoyados en la costa, de manera aislada o integrados a un dique rompeolas.

Dispositivos de segunda generación. Incluye los dispositivos *near-shore*, los cuales pueden encontrarse fijos o flotando, cercanos a la costa.

Dispositivos de tercera generación. Incluye los dispositivos *offshore*, que pueden encontrarse sumergidos o flotando, fuera de la costa.

2.3.2.2 Según su geometría y posición relativa respecto del oleaje

Totalizadores o terminadores. Son dispositivos largos, que tienen su eje principal paralelo al frente de olas, es decir, perpendicular a la dirección en que las olas se mueven. Se caracterizan porque eliminan la ola incidente, de manera que tras éstos sólo existe la ola radiada por el cuerpo en su oscilación, además de que extraen la energía de las mismas de una sola vez.

Dentro de los dispositivos totalizadores destacan: el dispositivo totalizador fijo *Rectificador Russell* y el dispositivo totalizador flotante *Pato Salter*.

Atenuadores. Son dispositivos largos, cuyo eje principal es paralelo a la dirección del movimiento de las olas, es decir, perpendicular al frente olas. En este caso, no eliminan la ola incidente, sino que la atenúan.

Su estructura larga y estrecha les permite extraer la energía de forma progresiva, tanto de la dirección de avance de la ola, como de ambos lados del convertidor.

Además, la geometría de la estructura tiene la ventaja de que permite compensar las fuerzas a ambos lados, de manera que se reduce la exposición de daños y los esfuerzos de anclaje.

Captadores puntuales. Son dispositivos aislados, de dimensiones reducidas, que aprovechan la concentración y la convergencia del oleaje.



Figura II.9 Detalle del dispositivo captador puntual "Power Bouy". Fuente: www.oceanpowertechnologies.com/

2.3.2.3 Según la posición relativa de los dispositivos respecto del agua

Dispositivos de estructura fija o inmóvil. Consisten en dispositivos cuya estructura principal se ancla al fondo del mar o en la costa, de manera que resulta fija. Existen también unos elementos que pueden moverse respecto a la estructura fija, cuando las olas actúan sobre los mismos, y que convierten la energía del oleaje en energía mecánica (la cual es generalmente transformada en energía eléctrica).

Dispositivos de estructura flotante ó semisumergidos. Consisten en dispositivos que oscilan con las olas. Para ello, disponen de un armazón estable de referencia para que las partes activas del aparato se puedan mover respecto de la estructura principal. Esto se puede lograr aprovechando la inercia, o haciendo la estructura suficientemente grande para que se apoye en varias crestas de olas y pueda permanecer razonablemente estable en la mayoría de los estados del mar.

Dispositivos de estructura sumergida. Consisten en dispositivos que están totalmente sumergidos y anclados al fondo oceánico, de manera que captan el movimiento de las olas suboceánicas. Son menos comunes que los anteriores. Destacan los proyectos *Anaconda Wave Energy Converter* y el dispositivo *Waveroller*.

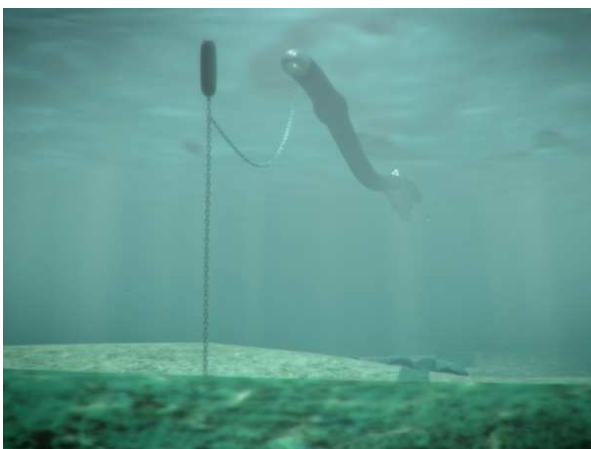


Figura II.10 Detalle de una de las "mini anacondas" de goma que están siendo probadas. Fuente: www.checkmateuk.com/seaenergy/

2.3.2.4 Según el tipo de energía que aprovechan

Dispositivos de rodillo o rueda. Aprovechan la energía cinética y la energía potencial de la ola.

Dispositivos de impacto o pendulares. Aprovechan una cantidad muy pequeña de la energía incidente.

Dispositivos flotadores. Aprovechan sólo la energía potencial de la ola, proporcional a la masa de agua desplazada y a la altura de la ola incidente.

Dispositivos convertidores de energía potencial. Aprovechan sólo la energía potencial de las olas, en su ascenso por unos depósitos.

2.3.2.5 Según el principio de funcionamiento

En la 2ª Jornada Internacional sobre Energía Marina (ciudad de Barakaldo Bilbao, Enero de 2007), durante la presentación de la empresa privada Tecnalia por parte del director de Oceantec, se expusieron diferentes clasificaciones de los dispositivos captadores de la energía del oleaje.

La figura II.11, perteneciente a dicha presentación, hace referencia a la clasificación de los dispositivos en función del principio de captación de la energía del oleaje, es decir, en función del principio de funcionamiento.

3. Clasificación por principio de captación

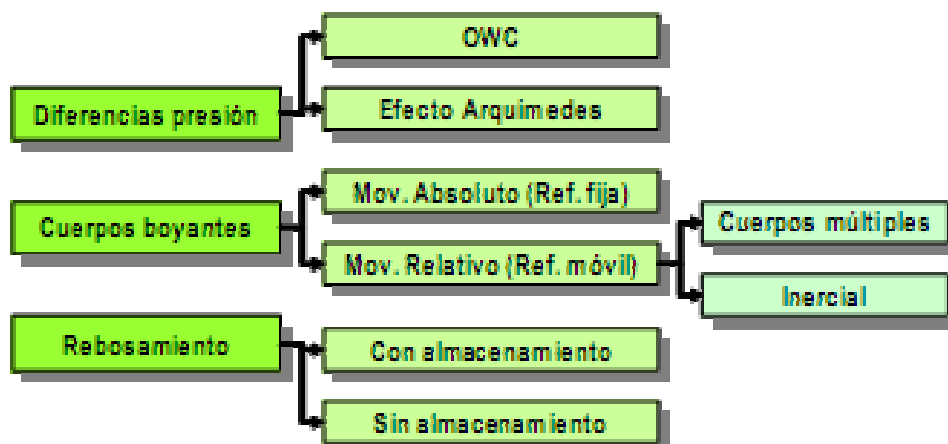
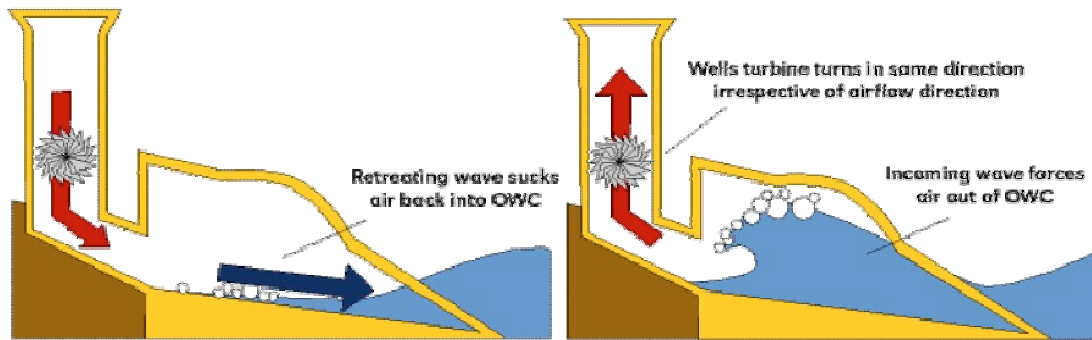


Figura II.11 Clasificación de los dispositivos captadores según el principio de captación. Fuente: Ruiz, J.P. (2007)

Diferencias de presión. El sistema de captación aprovecha las diferencias de presión creadas por el oleaje en un fluido, normalmente aire, distinguiéndose dos fenómenos:

- **Dispositivos de columna de agua oscilante u OWC (Oscillating Water Column).** Estos dispositivos consisten en una estructura hueca, parcialmente sumergida, que está abierta al mar por su parte inferior.



Figuras II.12 Esquema del funcionamiento del dispositivo captador OWC. Fuente: Legaz, R. (2006)

Esta estructura encierra una columna de aire en la parte superior de una columna de agua. Cuando las olas actúan sobre el aparato hacen que la columna de agua suba y baje, con lo cual la columna de aire se comprime y descomprime alternativamente. Es decir, se aprovecha el principio de la cavidad resonante. Si a este aire atrapado se le permite fluir desde la atmósfera a través de los alabes de una turbina, puede extraerse energía mecánica del sistema y usarse para generar electricidad mediante un generador eléctrico mecánicamente acoplado a la turbina.

A su vez, los dispositivos captadores OWC pueden clasificarse según la tipología de su instalación en:

De estructura fija: se encuentran los dispositivos *Pico* y *Limpet* (estructura aislada) y el dispositivo *Mutriku* (estructura en rompeolas).

De estructura flotante: se encuentra el dispositivo *Mighty Whale*, que constituye el aparato flotante OWC más grande del mundo. El prototipo posee un peso de 4.400 toneladas y unas dimensiones de 50 metros de largo por 30 metros de ancho.



Figura II.13 Diferentes perspectivas del dispositivo captador OWC flotante "Mighty Whale" (Bahía de Gokasho, Océano Pacífico). Fuente: www.marinetalk.com/

- **Efecto Arquímedes.** Son los dispositivos que aprovechan la fluctuación de la presión estática originada por la oscilación del nivel del agua al paso de la ola. En consecuencia, sufren un movimiento de oscilación vertical y/o de rotación, durante su funcionamiento. Se utiliza una cámara de aire cerrada que puede variar su volumen en función de la presión a la que se someta.

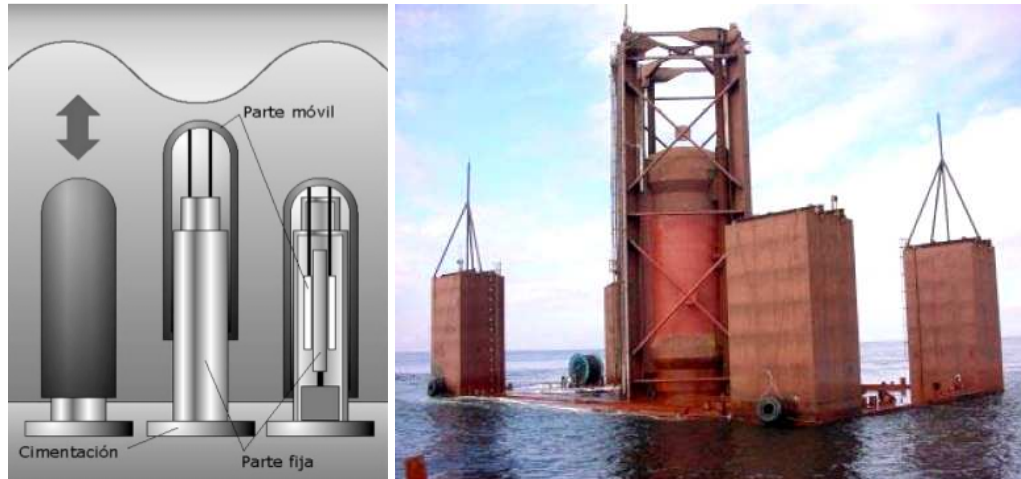


Figura II.14 Detalle y esquema conceptual de operación del dispositivo sumergido "AWS" (costa de Portugal). Fuente: <http://www.awsoccean.com/>

Se pone el ejemplo del caso de la compañía *Archimedes Wave Swing (AWS)* que ha desarrollado un sistema totalmente sumergido, que extrae energía de las olas aprovechando el movimiento de subida y bajada de las mismas. La parte inferior del sistema captador se fija al fondo, mientras que la superior puede desplazarse verticalmente.

Cuerpos flotantes. El sistema captador se basa en cuerpos flotantes movidos por las olas. El movimiento oscilatorio aprovechable puede ser vertical, horizontal, de cabeceo o una combinación de ellos. Por otra parte, este movimiento inducido puede ser absoluto (entre el cuerpo flotante y una referencia fija externa) o relativo (entre dos o más cuerpos).

Un ejemplo es el dispositivo *Pelamis*, perteneciente también al grupo de los dispositivos atenuadores y que se encuentra en una fase más avanzada de desarrollo.



Figura II.15 Detalle del dispositivo captador flotante "Pelamis". Fuente: <http://www.pelamiswave.com/>

Rebosamiento y/o impacto. Se trata de dispositivos que aprovechan la energía potencial (i/o cinética) de las olas incidentes. Mediante el diseño concreto de la estructura del dispositivo, se fuerza el rebosamiento (que el agua pase por encima de la estructura) y/o impacto de las olas (que el agua impacte en estructuras articuladas o flexibles), aumentando su energía mecánica.

A su vez, estos dispositivos pueden clasificarse según sean:

De estructura fija: su principio de funcionamiento es similar al de las centrales hidroeléctricas. Las olas captadas por el dispositivo se envían a través de una rampa, a un depósito que se encuentra por encima de la cota del mar, donde el agua entra en contacto con unas turbinas acopladas a unos generadores eléctricos y luego se devuelve al mar. Ejemplos de este tipo de convertidores son los dispositivos *Seawave Slot-Cone Generator SSG* y los *canales ahusados (Tapchan)*.

De estructura flotante: su esquema operacional es similar a los convertidores de estructura fija. Tienen la ventaja de que permiten también el almacenamiento de la energía. Se incluyen aquí los dispositivos *Wavedragon* y *Waveplane*.



Figura II.16 Detalle del dispositivo captador por rebosamiento e impacto: "Dragón de Olas".
Fuente: <http://www.wavedragon.net/>

2.3.2.6 Según el modo de obtención de la energía

Sistemas activos u oscilantes. En estos dispositivos, la estructura no permanece inmóvil y la energía se genera aprovechando el movimiento relativo entre las partes fijas y partes las móviles de los elementos del sistema.

Dentro de los sistemas activos se distinguen dos tipos: en los que el oleaje actúa directamente sobre el cuerpo móvil y en los que se utiliza una interfaz agua-aire, de modo que la ola desplaza al aire, que a su vez desplaza el cuerpo móvil.

Sistemas pasivos o estáticos. Son los sistemas en los que la estructura permanece inmóvil durante todo el proceso de captación, de manera que la energía se genera sólo con el movimiento propio de las partículas.

2.3.2.7 Según el uso final de la energía

Los dispositivos captadores también se pueden clasificar atendiendo a las múltiples aplicaciones que presenta la fuente de energía. Y es que una de las ventajas de la energía del oleaje es que gracias al desarrollo de la tecnología, el agua incorporada puede ser aprovechada para usos distintos. Éstos son:

- La obtención de energía eléctrica y su inyección a la red.
- La producción de hidrógeno por electrólisis.
- La desalinización del agua de mar por ósmosis inversa.
- El bombeo del agua captada en zonas solicitadas (piscifactorías...)
- El calentamiento del agua captada para zonas solicitadas.
- La protección de alguna zona costera concreta mediante la reducción del impacto del oleaje y la modificación de los patrones de los sedimentos.
- La aparición de hábitas artificiales: las plantas podrían atraer y promover poblaciones de distintas criaturas marinas.

En función de estos usos, se determinan los parámetros de diseño de la instalación y la calidad de la energía final.

2.3.2.8 Según el ratio aproximado Potencia entre Superficie del dispositivo

Otra clasificación de interés es la que presentan los investigadores García, S. y de la Villa, A. (2007), en un artículo de revista referente a la energía del oleaje. Ésta consiste en dar una relación de los dispositivos existentes, agrupados según su ubicación respecto a la costa, y de sus parámetros característicos:

- Potencia del dispositivo (kW).
- Superficie de ocupación del dispositivo (m^2).
- Ratio aproximado Potencia/Superficie (kW/m^2).

Se ha creído interesante adjuntar una tabla confeccionada a partir de algunos de los datos que recogen dichos investigadores (tabla II.2), para tener una idea de los órdenes de magnitud que alcanzan los dispositivos captadores de la energía del oleaje, en cuanto a su potencial y dimensiones.

De ella se deduce que la mayoría de los dispositivos existentes en la actualidad se encuentran ubicados en la costa, siendo los dispositivos ubicados en aguas intermedias los que cuentan todavía con un número inferior. Esto se contradice con el hecho de que los dispositivos ubicados en aguas profundas (calados entre 50 y 100 metros) son los que disponen de mayores potenciales energéticos.

En cuanto al ratio aproximado indicado, en realidad, éste hace referencia al impacto medioambiental que puede tener la instalación de un dispositivo captador. Ratios iguales o inferiores a la unidad indican que, para un potencial concreto, el dispositivo requiere de una gran superficie costera o marina, y por lo tanto, su impacto al medio será mayor. Por otro lado, para potenciales iguales o similares, se observa que en función de la elección del dispositivo (como es el caso de las OWC Energetech y Kvaerner) se puede obtener una reducción muy sustancial de la superficie necesaria, y por lo tanto, del impacto.

De todas maneras, hay que tener presente que este ratio sólo tiene en cuenta las dimensiones del dispositivo, y existen también otros aspectos relativos a su diseño (como la forma, materiales...) que pueden contrarrestar o amplificar, dicho impacto.

Tabla II.2 Clasificación de algunos dispositivos existentes. *Fuente: García, S. i de la Villa, A. (2007)*

	Potencia del dispositivo (kW)	Superficie de ocupación (m ²)	Ratio aprox. Potencia/Superficie
Dispositivos captadores ubicados en la costa			
Balsa de Cockerell	2000	5000	0,40
Convertidor Belfast	75	51	1,47
OWC Alda	1000	-	-
OWC Breakwave	750	525	1,43
OWC de China	30	40	0,75
OWC de Kujukuri	30	31	0,97
OWC de Pico	400	96	4,16
OWC de Unión Fenosa	27	48	0,56
OWC Energetech	500	875	0,57
OWC Kvaerner	500	79	6,33
OWC Limpet	500	84	5,95
OWC Nereida	250	700	0,36
OWC Sakata	60	360	0,16
Tapchan	400	7000	0,06
Dispositivos captadores ubicados cerca de la costa (aguas intermedias)			
AWS	1200	90	13,3
BBDB	200	36	5,5
OWC Mighty Wale	110	1200	0,092
Oyster	500	216	2,31
Waveplane	30	22	1,36
Waveroller	13	16	0,81
Wavestar	6000	1440	4,16
Dispositivos captadores ubicados lejos de la costa (aguas profundas)			
Aquaboy	500	157	3,18
Buque Kaimei	2000	960	2,08
El Pato Salter	2310	4050	0,57
OWC Clam	2500	2827	0,88
OWC NEL	2000000	1552000	1,29
Pelamis	750	490	1,53
PowerBuoy	20	20	1
Searev	500	375	1,33
Wavebob	1500	225	6,66
Wavedragon	6000	51000	0,12
Dispositivos captadores ubicados en cualquier dominio			
SSG	1200	75000	0,016

2.3.3 Aspectos clave para el diseño

En el apartado anterior, referente al estado del arte de la tecnología de captación de la energía del oleaje, se ha dado una relación de los principales dispositivos captadores existentes en la actualidad.

Independientemente de la gran variedad observada, todos ellos son concebidos con el mismo objetivo principal, que es el del aprovechamiento óptimo de la energía del oleaje en una zona concreta.

Conseguir esto supone la elección más adecuada del dispositivo. Es decir, tener en cuenta el conjunto de singularidades que caracterizan la zona, para el diseño de las instalaciones.

Por lo tanto, la solución final no es única para todos los ámbitos sino específica de cada problema (y de ahí que exista un gran número de patentes al respecto).

Sin embargo, un análisis exhaustivo de las tecnologías de aprovechamiento de la energía del oleaje y de los principales equipos actualmente en desarrollo, permite evaluar sus ventajas e inconvenientes, pudiendo extraer una serie de conclusiones de aplicación genérica.

En la 2ª Jornada Internacional sobre Energía Marina (ciudad de Barakaldo, Bilbao, Enero de 2007), se indicaron los siguientes aspectos clave a tener en cuenta durante el diseño de cualquier tipo de instalación (tabla II.3).

Tabla II.3 Aspectos claves a tener en cuenta en la fase de diseño. *Fuente: Ruiz, J.P. (2007)*

	Tipología dispositivo	Ventajas
Impacto	Ubicación en mar abierto	<ul style="list-style-type: none"> Menor impacto y rechazo social. Gran multiplicidad de emplazamientos. Mayor potencial energético.
Eficiencia y coste	Atenuador	<ul style="list-style-type: none"> Mayor capacidad de captar energía: absorción progresiva. Menores esfuerzos en los amarres. Alto rendimiento energético por unidad de peso. Coste de inversión competitivo.
Robustez y disponibilidad	Captación Inercial	<ul style="list-style-type: none"> Elementos móviles totalmente encapsulados. Buena protección frente a la corrosión marina insensible a las mareas. Menor riesgo de averías y contaminación del medio. Instalación y mantenimiento sencillos.

2.4 Ventajas e Inconvenientes

La energía del oleaje se caracteriza por ser una energía relativamente predecible, consistente, modular y muy concentrada.

Como se vio en el estado del arte, presenta una elevada flexibilidad para su instalación (en tierra, cerca de la costa o mar adentro) y una polivalencia en cuanto a su uso: independientemente de la generación de electricidad, presenta otras aplicaciones como la producción de hidrógeno por electrólisis, la desalinización de agua por ósmosis inversa...Que contrarresta los costes de una producción unilateral.

Por otro lado, gracias a los grandes potenciales aprovechables que pueden concentrarse en algunas zonas marinas, la energía del oleaje puede posibilitar el desarrollo de economías locales y el suministro energético de zonas aisladas geográficamente, como es el caso de las islas.

El principal inconveniente que se presenta es que al tratarse de una energía joven (en fase de desarrollo), los costes de instalación y de funcionamiento de los dispositivos captadores son todavía elevados. Sin embargo, gracias al progreso que se está experimentando en las diferentes tecnologías y a la determinación de investigadores y empresas de apostar por esta energía, se están produciendo reducciones significativas de los costes y se estima que a largo plazo podrán ser amortizables.

También está el inconveniente de los temporales a los que se exponen las instalaciones, que ya ha afectado al funcionamiento de algunos de los primeros prototipos instalados, dejando inutilizado parte de sus sistemas. Esto supone dificultades en el diseño de estos sistemas ya que por un lado éste ha de posibilitar el funcionamiento con regímenes de olas muy variados y por otro lado, ha de permitir soportar cargas estructurales en condiciones atmosféricas extremas.

Además, antes de que sea ampliamente usada, se deben resolver otra serie de aspectos de tipo medioambiental, que resultan inconvenientes en las anteriores energías y que aparecen sobretodo en los dispositivos ubicados en la costa: el impacto visual, el ruido, posibles molestias y destrucción de la vida marina, erosión de la costa, conflictos con la navegación e interferencias en la pesca y actividades recreativas...

Eligiendo cuidadosamente el emplazamiento de las instalaciones para la captación y la gestión de la energía del oleaje, muchos de estos impactos pueden reducirse y ser reversibles a la larga.

2.5 Comparativa entre las Energías del Mar

Actualmente, todas las formas de extraer energía del mar se encuentran en fase de desarrollo, existiendo una gran variedad de plantas pilotos, pero sin haber llegado aún a una fase comercial.

Al igual que el resto de energías renovables, el diseño de los dispositivos convertidores ha de ser lo suficientemente sofisticado como para que sea eficiente, seguro y económicamente factible, al mismo tiempo. Sin embargo, todavía existe una falta de información y desentendimiento respecto de este tipo de energías, por parte de la industria, los gobiernos y de la población; que ralentiza el proceso de investigación.

En consecuencia, un aspecto negativo de todas las energías del mar es que el coste de su implantación sigue siendo muy elevado y la utilización energética rentable es muy baja.

Un hecho común de las energías del mar, es que todas ellas presentan un cierto umbral de aprovechamiento, el cual restringe la localización de las instalaciones de una planta de conversión energética y condiciona en mayor o menor grado la posible implementación o no de ésta.

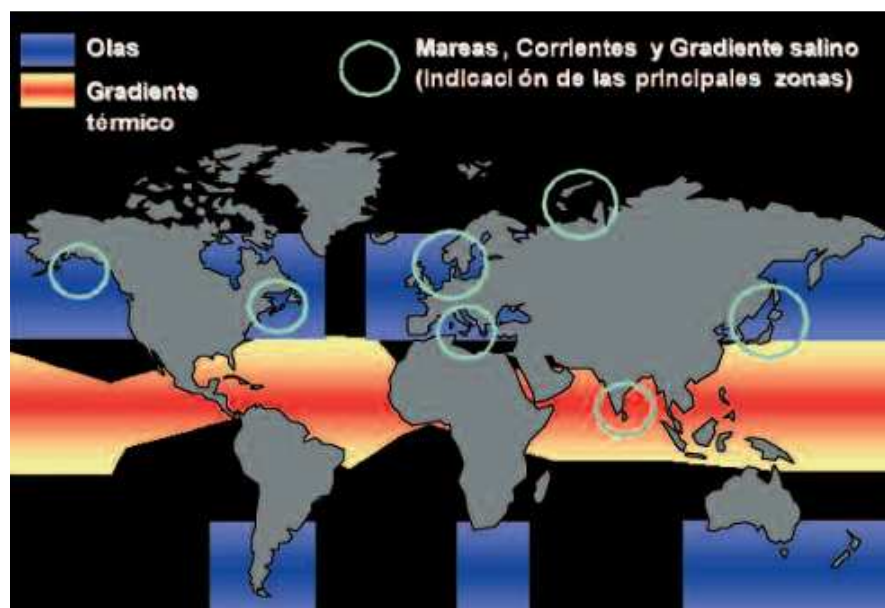


Figura II.17 Distribución mundial de las energías del mar. Fuente: Ibáñez, P. (2008)

A nivel de localización, la energía azul y la energía mareomotriz son las más limitadas, ya que sólo pueden ser concebidas en zonas puntuales, que no tienen por qué disponer todas las franjas costeras (desembocaduras de ríos, estuarios). En el caso de la energía mareomotriz, este hecho se agrava con la necesidad de superar una cierta cota de amplitud de marea, haciendo que el número de estuarios posibles se reduzca considerablemente. Este inconveniente también se presenta, en menor grado, en la energía asociada a las corrientes marinas: existen muy pocas ubicaciones con las características que requiere, y en algunos casos, las que hay, tienen la limitación del tráfico marítimo y otros usos.

El resto de las energías puede tratarse de forma extensiva, de manera que el principal condicionante es la magnitud del fenómeno que las origina. Por ejemplo, las plantas

maremotérmicas pueden ubicarse en los diferentes dominios (en la costa, cerca de la costa y alejadas de la costa), sin embargo la cota mínima del gradiente océano térmico suele presentarse en grandes profundidades (fuera del dominio de aguas profundas) que pueden resultar inaccesibles, tanto para la implantación de las instalaciones como para el transporte de la electricidad a las zonas de consumo.

En el caso de la energía del oleaje, existe una buena correlación entre el recurso y la demanda: Cifuentes J.L. (1991) indica que el 53% de la población mundial vive a menos de 100 km. de distancia de la costa y al tratarse de una energía extensiva que presenta flexibilidad en la ubicación de las instalaciones se puede adecuar ésta a la oferta y a la demanda de la zona. El único inconveniente en este caso es que las tecnologías desarrolladas hasta ahora pueden no ser capaces de soportar las condiciones climatológicas adversas. Por ejemplo, en el caso de huracanes, la carga sobre el sistema puede ser 100 veces mayor a la media.

En cuanto al potencial energético, hay que discernir entre el potencial total disponible y el potencial realmente aprovechable. Tal y como se indica en la tabla II.2, las energías asociadas a los gradientes de densidad y de temperatura son las que presentan un mayor potencial energético disponible, lo cual es obvio ya que su magnitud es directamente proporcional al volumen de la masa de agua oceánica. Sin embargo, todavía no se puede hacer una valoración sustancial, en términos de potencial aprovechable.

En la actualidad se han realizado instalaciones maremotérmicas de carácter experimental en Hawai, India y Japón, destacando la plataforma flotante instalada en la India (2001) que cuenta con una potencia de 1 MW. En cuanto a la energía azul, la compañía noruega Statkraft anunció en 2008 la construcción de la primera planta piloto en el mundo de generación eléctrica con esta tecnología, con una potencia entre 2 y 4 kW.

La energía del oleaje es la que presenta un mayor potencial energético aprovechable, que además es ininterrumpido (no es intermitente como en el caso de la energía mareomotriz) y sigue la demanda eléctrica en climas templados; lo que hace pensar que con el apropiado diseño de los dispositivos pueda permitir una producción de energía económicamente viable, a medio y largo plazo.

Además, hay tener en cuenta que el desarrollo de las energías del mar también tiene que estar acorde con el desarrollo sostenible, combinando los factores cruciales de la economía con los medioambientales y los sociales. Esto se ve propiciado por su carácter limpio, que significa que no precisan de emisiones de CO₂ y que tienen un impacto ambiental negativo limitado.

Tabla II.5 Comparativa de las principales características de las energías del mar.

Energía del OLEAJE	Energía de las CORRIENTES MARINAS	Energía AZUL	Energía MAREMOTÉRMICA	Energía MAREOMOTRIZ	
3.5 TW	5 - 8 TW	1400 TW	40000 TW	3.7 TW	POTENCIAL
2 TW	30 GW	-	-	15 GW	Aprovechable
-	$V_{pico} > 2,25$ m/seg.	Rendimiento de membrana mínimo = 5 W/m ²	Gradiente Térmico > 20°C	Amplitud de marea > 5 metros.	UMBRAL
En la costa, cercanos a la costa y en alta mar.	Profundidades entre 20 y 30 metros.	Desembocaduras de los ríos al mar.	En la costa, cercanos a la costa y en alta mar.	Estuarios y bahías.	UBICACIÓN
Carácter renovable.	Carácter renovable.	Carácter renovable.	Carácter renovable.		VENTAJAS
Fenómeno predecible, consistente y concentrado.	Carácter renovable.	Permite otras aplicaciones.	Permite otras aplicaciones.	Carácter renovable.	
Gran potencial energético.	Disponibilidad predecible.	Ubicación cercana a zonas urbanas.	Ubicación flexible de las instalaciones.	Fenómeno regular y predecible.	
Permite otras aplicaciones.	Inmunidad ante los temporales.	Impacto ambiental controlable y reducido.			
Ubicación flexible de las instalaciones.					
Altos costes económicos de instalación y funcionamiento.	Impacto negativo en la navegación y actividades marítimas.	Altos costes económicos de instalación y funcionamiento.	Altos costes económicos de instalación y funcionamiento.	Altos costes económicos de instalación y funcionamiento.	INCONVENIENTES
Tecnología poco desarrollada.	Tecnología desarrollada.	Tecnología desarrollada.	Tecnología desarrollada.	Localización limitada.	
Impacto medioambiental negativo, en los sistemas de costas.	Localización limitada.	Localización limitada.	Localización limitada.	Funcionamiento intermitente.	
Gran sensibilidad ante los temporales.				Impacto medioambiental negativo.	

Sin embargo, a veces puede ser preferible la no implantación de ciertas energías, como es el caso de la energía mareomotriz. Las centrales mareomotrices requieren de mucho espacio que suele coincidir con zonas ricas en fauna y flora marina (estuarios y marismas), lo que supone un impacto ecológico negativo.

Ante esto, otra consecuencia positiva de que los dispositivos captadores de la energía de las olas presenten flexibilidad en la ubicación, es la escasa demanda en cuanto al uso del suelo; de manera que puede reducirse a priori la modificación del paisaje.

Dentro de las acciones que se están llevando a cabo por el proyecto Wavenergy, se encuentra la realización de un *estudio comparativo de las diferentes fuentes de energía renovable* marina donde se hace también hincapié al aspecto medioambiental.

En el informe se indican los principales impactos de las instalaciones sobre el medioambiente y la magnitud de algunos de ellos, en función de la fuente de energía marina aprovechada (tabla II.4):

- Impacto sobre la vida del litoral.
- Impacto sobre la vida en el mar.
- Impacto sobre la morfología del litoral.
- Impacto visual.
- Impacto sonoro.
- Impacto sobre las actividades humanas.

Tabla II.4 Caracterización del impacto ambiental de las energías del mar. No se ha incluido la "Presión osmótica" debido a que aún no hay equipos desarrollados. *Fuente: Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, SA (2007)*

		Vida Litoral	Vida Marina			Morfol. Litoral	Visual	Sonoro
			SUPRA	MESO	SUB			
de	Descarga mareas	MEDIO	MEDIO	-	-	ALTO	ALTO	MEDIO
	Gradiente Térmico Oceánico	BAJO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO
	Corrientes Marinas	BAJO	MEDIO	-	-	BAJO	BAJO	BAJO
Olas de viento								
	Orilla	ATO	ALTO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	MEDIO
	Mar Adentro	BAJO	-	MEDIO	-	BAJO	BAJO	BAJO

Por lo tanto, los efectos sobre el medioambiente también dependerán estrechamente del tipo de dispositivo utilizado.

Finalmente, como conclusión de lo expuesto en lo referente a las energías del mar, se ha confeccionado una tabla resumen con los aspectos más importantes de cada una de ellas (tabla II.5).

De ésta se deduce que la energía del oleaje resulta ser la más prometedora por disponer de un basto potencial energético aprovechable, además de contar con las ventajas de las anteriores: presenta flexibilidad en sus ubicaciones y mediante una buena gestión en su diseño puede reducirse considerablemente su impacto medioambiental.

2.6 Panorama energético actual

Desde el advenimiento de la revolución industrial (aproximadamente 150 años atrás), el consumo energético mundial ha crecido de forma continuada, apoyado por la revolución que supuso el uso del carbón (1750), del petróleo (1850) y del gas (1920).

En la actualidad, este fenómeno se amplifica (figura II.18). Según estudios realizados por la Agencia Internacional de la Energía (IEA), se espera que dicho consumo aumente en un promedio del 2% anual hasta 2020, lo que equivaldrá a duplicarse para 2035 en comparación con 1998, y a triplicarse para 2055.

Esto se debe al crecimiento económico-demográfico mundial y a la expansión urbana que está experimentando la sociedad. La esperanza de vida se ha doblado, el número de habitantes es seis veces mayor, y el consumo energético per cápita se ha multiplicado por cincuenta.

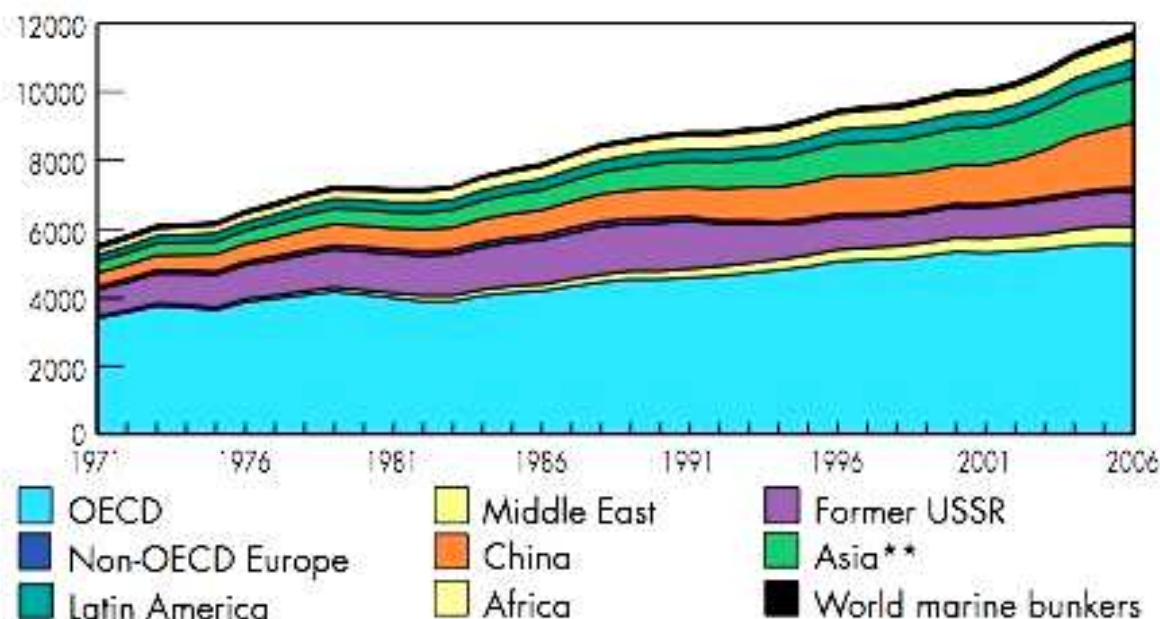


Figura II.18 Evolución mundial del consumo total, desde 1971-2006, por regiones (Mtoe). Fuente: *Manual de Estadísticas Energéticas* (IEA)

Obviamente esta misma evolución se podría observar a nivel de las fuentes energéticas. Concretamente, durante el siglo veinte se manifestó un rápido incremento en el uso de los combustibles fósiles que se multiplicaron por veinte.

Los servicios energéticos predominantes continúan siendo la quema de combustibles fósiles y la energía nuclear. Según la Agencia Internacional de la Energía (2006) éstos representaron alrededor del 87% de la energía total producida en el mundo en el año 2006.

Sin embargo, el conjunto de las energías renovables tan sólo supuso un 14% de la energía primaria que se utiliza en el mundo, destacando entre ellas, la energía solar y la energía eólica (0.5% y 0.05% de la energía total producida, respectivamente).

En el caso de las energías del mar, éstas sólo representaron un 0.02% del total de las energías renovables, que equivaldría a aproximadamente un 0.003% de la energía primaria.

Esta desventaja de las energías marinas se puede traducir mediante la reflexión que hace Martínez-Val, J.M. (2006) acerca de ellas: que a pesar de que presentan posibilidades interesantes de explotación...En el contexto global es muy poco lo que pueden aportar. Por tanto, su contribución en el largo plazo, al desarrollo energético sostenible sería muy marginal.

La principal causa se debe a que los recursos energéticos originales disponibles son muy dispares (tabla II.6):

Tabla II.6 Recursos energéticos originales disponibles en algunas de las energías renovables.
Fuente: Herman, W. (2005)

Energía solar	120.000 TW
Energía eólica	300-870 TW
Energía del oleaje	3 TW

Ante estos órdenes de magnitud parece obvio que por muy reducido que sea el potencial aprovechable, siempre será mayor en el caso de la energía solar y de la energía eólica (tabla II.7):

Tabla II.7 Potencial aprovechable en algunas de las energías renovables.
Fuente: Herman, W. (2005)

Energía solar	300 TW
Energía eólica	72 TW
Energía del oleaje	2 TW

Sin embargo, estas cifras no han de ser motivo de exclusión de las energías del mar y menos aún de la energía del oleaje, ya que se trata de valores promedios globales y las energías renovables están concebidas para el desarrollo de “tecnologías locales” que, entre todas ellas, reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles, a largo plazo.

De hecho, muchas tecnologías basadas en energías renovables se prestan para aplicaciones no conectadas a redes de suministro, como es el caso de las zonas rurales apartadas o las pequeñas aldeas.

Entonces:

- Las energías renovables no han de ser excluyentes entre ellas sino complementarias.
- El aprovechamiento de las energías renovables no es una solución viable independientemente de la ubicación.

Por ejemplo, la energía solar está condicionada por los patrones meteorológicos y

además, durante la noche, no produce electricidad. Sería un error implantar este tipo de energía en los países ubicados en las latitudes altas boreales y septentrionales, donde la demanda energética es más elevada en invierno. Por otro lado, sus instalaciones solicitan grandes extensiones de suelo diáfano del que la mayoría de las grandes ciudades no disponen.

De hecho, Martínez-Val, J.M. (2006) indica que los mejores rendimientos económicos de la energía solar se obtendrían, lógicamente, en las zonas con la más alta insolación, y ello nos lleva a las extensas zonas desérticas, que es donde verdaderamente se concentra el potencial solar del planeta. Lo que se contradice con el hecho de que estas zonas se encuentran totalmente despobladas y aisladas de las grandes urbanizaciones...

Igualmente pasa con la energía eólica: la mayor parte de su potencial está disponible sobre océano abierto, y por lo tanto, todavía no existe la tecnología adecuada para poder gestionarla.

Las energías del mar pueden generalizarse a las zonas costeras, posibilitando la autosuficiencia de éstas. En este caso, el conjunto de ventajas de que disponen, hace que sean mejores candidatas que otras energías renovables en estas zonas.

Concretamente la energía del oleaje cuenta con una serie de factores que lo ponen de manifiesto:

- Ya se indicó que se trata de una energía muy concentrada:
 - 10-30 veces más concentrada que la energía solar.
 - 5 veces más concentrada que la energía eólica.

En términos de intensidad media de la energía:

Tabla II.8 Intensidad media de algunas de las energías renovables.
Fuente: Ibáñez, P. (2008)

Energía solar	100-200 W/m ²
Energía eólica	400-600 W/m ²
Energía del oleaje	2000-30000 W/m ²

De manera que para generar una determinada cantidad de electricidad a partir del oleaje, se requiere de espacios más reducidos.

- La divergencia en el diseño de las instalaciones permite la adaptabilidad al medio sin tener que intervenir en el espacio destinado para la civilización.
- Las instalaciones ayudan a proteger las zonas costeras de la erosión marina, huracanes...
- No hay interrupciones de suministro.
- Las instalaciones podrían proveer también de agua potable a comunidades costeras áridas.

En cuanto al aspecto económico, es improbable que la energía del oleaje (al igual que el resto de las energías del mar) sea económicamente competitiva frente al resto de energías, en un futuro cercano.

La explotación de la energía del oleaje supone altos costes de inversión, debido sobre todo a las grandes estructuras necesarias para captar una cantidad significativa de energía (tabla II.9):

Tabla II.9 Inversión que se precisa para la instalación de un kilovatio (kW) de algunas de las energías renovables.
Fuente: Datos publicados por la Comisión Europea (2002)

Energía solar	6.000 €
Energía eólica	1.300 €
Energía del oleaje	12.000 €

Este hecho puede quedar contrarrestado con los costes de operación y mantenimiento, que son relativamente bajos, en función de la ubicación de las instalaciones (representan entre un 3% y un 8% del total de los costes de inversión).

Los costes de la energía obtenida también son todavía elevados comparados con el precio del kWh "convencional" que se está pagando. Por ejemplo, la planta recién inaugurada en Portugal es "comercial" gracias a las ayudas institucionales: cada kilovatio hora (kWh) producido será pagado a 26 céntimos de euro, mientras que el kWh "convencional" se está pagando por debajo de los 9 céntimos.

Sin embargo, Clément *et ál.* (2002) afirman que el precio de la electricidad generada con parques de olas ha mejorado mucho en los últimos 25 años, y se espera que gracias a los avances tecnológicos, esto siga siendo así en la próxima década (tabla II.10).

Tabla II.10 Coste estimado en los sistemas de la energía del oleaje.
Fuente: Datos publicados por la Comisión Europea (2002)

2005	0,1-0,2 kW/€
2010	0,08 -0,12 kW/€
2020	0,03-0,05 kW/€

Además, la energía de las olas podría proveer a comunidades costeras en países sin una red de electricidad nacional, evitando los costes de las líneas de transmisión.

Obviamente, el factor económico es el principal condicionante del desarrollo de la energía del oleaje (tanto a nivel de la investigación, como a favor de la creación de un mercado competitivo). Es por ello que parece interesante tener en cuenta el posicionamiento que mantienen los defensores de la energía del oleaje que alegan que:

«La energía del oleaje no fue diseñada para ahorrar dinero, sino para salvar el mundo»

Capítulo III

Potencial Energético del Oleaje

3.1 Introducción

Desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía del oleaje, interesa conocer el flujo medio de energía por unidad de anchura, que atraviesa un plano vertical perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Es decir, la velocidad a la que se transmite la energía del oleaje a través de una superficie y a través del tiempo.

Para entender la energía del oleaje hay que distinguir entre el perfil de la superficie de los océanos, que viene generado por las olas, y la naturaleza de la parte sumergida de las olas:

Las olas se mueven longitudinalmente con una velocidad de translación denominada celeridad (c).

A su vez, las moléculas de agua se mueven en trayectorias elípticas o circulares, en función de la relación que existe entre el tamaño de la altura de la ola (H) y la profundidad del agua (h) donde se están moviendo.

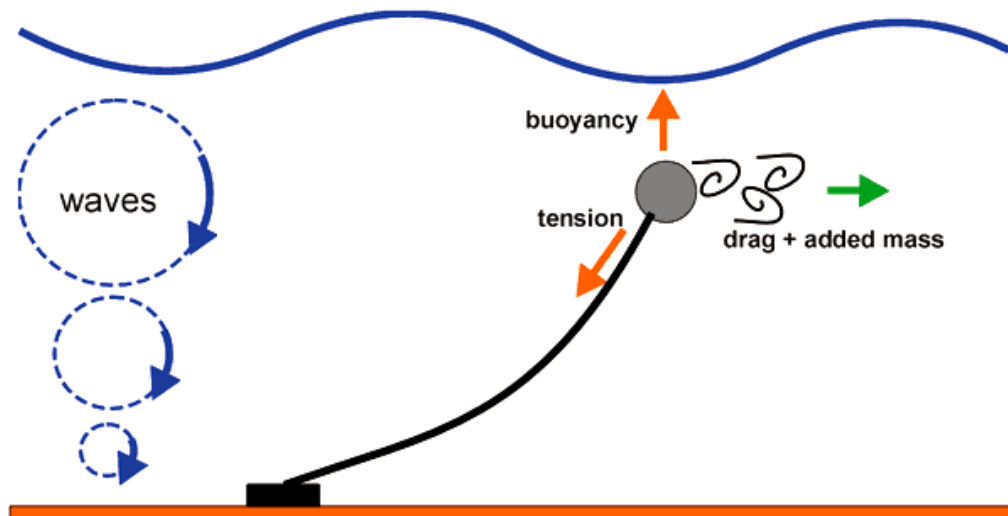


Figura III.1 Esquema del movimiento de una boya inducido por el oleaje.

Este comportamiento se asemeja al de una cuerda a la que se le hace oscilar: cuando se genera una onda en una cuerda, se observa un movimiento hacia arriba y hacia abajo de las partículas del medio material, a través del cual avanza la onda.

Por lo tanto, una ola oceánica no representa un flujo de agua sino un flujo de energía, desde su origen hasta su eventual rotura. Y esta energía es de dos tipos:

- La *energía cinética* debida al movimiento constante de las moléculas de agua, a lo largo de la columna de agua.
- La *energía potencial* debida a la elevación que sufren las moléculas de agua, por encima de la línea del mar en reposo, durante su movimiento.

Para la deducción del flujo medio de energía, se puede recurrir a las técnicas de estudio del oleaje:

- **Oleaje Regular:**

Descripción lineal del oleaje: teoría lineal de ondas o de Airy.

Descripción no lineal del oleaje: teoría de Stokes de 2º orden.

- **Oleaje Irregular:**

Descripción geométrico-estadística del oleaje.

Descripción espectral del oleaje.

Un detalle a tener en cuenta es que el flujo medio de energía del oleaje (F_e) puede denominarse también como potencial medio (o potencia media) del oleaje (P), y son lo que se conoce de manera genérica como potencial energético.

3.2 Cálculo del potencial en el Oleaje Regular

El oleaje se puede describir como un fenómeno regular que supone un movimiento periódico de sus aguas. Es decir, los parámetros característicos de un mismo punto cualquiera de una ola se mantienen constantes a lo largo del tiempo.

La regularidad puede expresarse de manera lineal ó no lineal, en función de la forma del perfil de la superficie del mar que se escoja para caracterizarlo.

Existen varias teorías que describen el oleaje como un fenómeno regular en todo su dominio. Sin embargo, los resultados obtenidos en su aplicación para diferentes problemas, en función de la profundidad relativa y del perfil de la ola, constatan que no siempre funcionan bien.

En aguas profundas, las olas superficiales tienen una altura de ola muy pequeña en comparación con su longitud de onda y su movimiento es aproximadamente sinusoidal (*teoría lineal de ondas o de Airy*).

A medida que el oleaje se propaga hacia la costa (aguas intermedias y someras), el efecto del fondo hace que la ola sufra una deformación, dejando de ser sinusoidal para hacerse asimétrica. Además, la altura de ola se incrementa conforme la profundidad disminuye (*teorías no lineales o de amplitud finita: teoría de Stokes, teoría cnoidal y teoría de ondas solitarias*).

Para el caso puntual de la evaluación del potencial medio de energía del oleaje, hay que definir previamente los dominios de trabajo. Esto se hace teniendo en cuenta las características (ventajas e inconvenientes) de las instalaciones según el dominio de ubicación.

Para los dispositivos ubicados en alta mar, se evalúa el potencial de energía en el dominio de aguas profundas. La teoría que mejor describe el oleaje en este dominio es la teoría de Airy, que supone el oleaje como un fenómeno regular y lineal.

Para los dispositivos ubicados cerca de la costa, se evalúa el potencial de energía en el dominio de aguas intermedias. La teoría de Stokes es la que mejor se adecua a este dominio, que supone el oleaje como un fenómeno regular y no lineal.

Finalmente, la evaluación del potencial energético en aguas poco profundas, correspondientes a las instalaciones ubicadas en la costa, se realizaría mediante las teorías no lineales: cnoidal y de ondas solitarias.

Sin embargo, este dominio se ha descartado debido a que la energía disponible en el oleaje de esta zona es mucho menor que en los anteriores dominios, por lo que en primera instancia no resulta adecuada para su conversión y aprovechamiento.

Tal y como se comentó cuando se hacía referencia a la propagación del oleaje, la energía que transportan las olas disminuye a medida que éstas se acercan a la costa, y este hecho se puede ver agravado por la interferencia de obstáculos durante su avance. Además, la tendencia natural de las olas al incidir en la mayoría de las costas (con disminución progresiva de calado), es la rotura, la cual produce una gran disipación de la energía.

3.2.1 Según la Teoría lineal de ondas o de Airy

La teoría lineal resulta de la simplificación del análisis físico y matemático de la propagación del oleaje en un fluido.

En cuanto a la forma del perfil de la superficie, la teoría lineal supone una onda sinusoidal que se describe mediante una función progresiva coseno, con una amplitud igual a la mitad de su altura de ola (figura III.2).

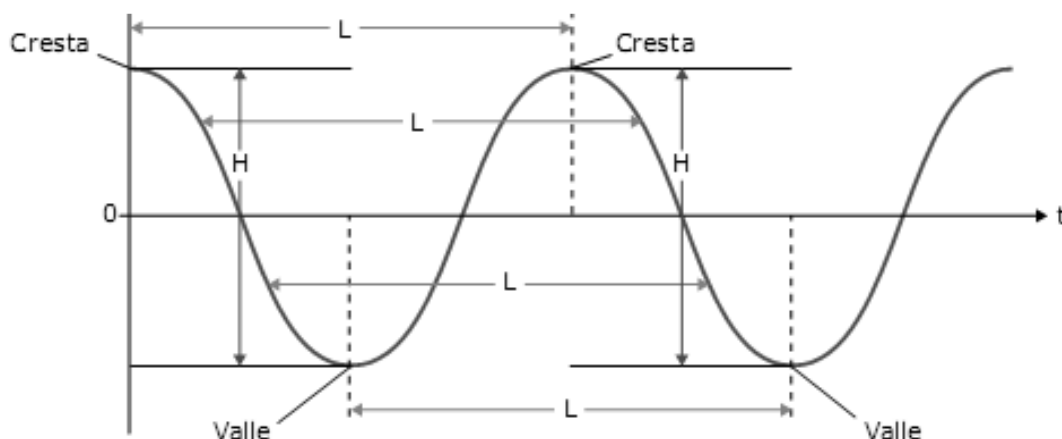


Figura III.2 Esquema del perfil del oleaje definido por una ola senoidal pura. Fuente: *Coastal Engineering Manual* (2002)

En cuanto al movimiento del fluido bajo la ola, se considera que las trayectorias de las partículas de agua son órbitas cerradas, por lo que se supone que no hay un transporte neto de masa de agua.

Estas órbitas son circulares en aguas profundas. A medida que disminuye la profundidad (en aguas intermedias y someras), el fondo empieza a afectar al desplazamiento vertical de las órbitas, de manera que éstas adquieren forma elíptica.

Cuando la profundidad es ya muy pequeña, el movimiento vertical queda totalmente impedido y las trayectorias de las partículas tienden a ser rectas horizontales.

Un aspecto a tener en cuenta para la definición del potencial medio de energía del oleaje, es el concepto de la *velocidad de grupo*.

Según la teoría de ondas lineal, el oleaje queda descrito a partir de la caracterización de una ola individual (que es senoidal pura). Sin embargo, cuando uno mira la superficie del

mar, lo que percibe como una ola en realidad es una superposición de muchas de ondas, cada una de las cuales posee características propias: su propia velocidad, periodo, altura de onda o amplitud, y dirección.

Es decir, la superficie del mar puede ser reconstruida como suma de un grupo de ondas de amplitud variable, tal y como se muestra en la figura III.3:

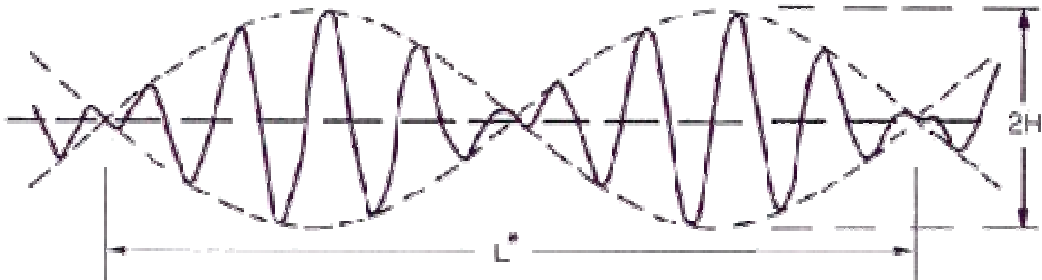


Figura III.3 Esquema de grupos de ondas. Fuente: *Coastal Engineering Manual* (2002)

La velocidad a la que viaja la envolvente de estas olas es lo que se conoce como la velocidad de grupo.

Por lo tanto, se distinguen dos velocidades diferentes de avance del frente de ondas: la celeridad de la onda o velocidad de fase (C), correspondiente al avance de una ola individual; y la velocidad de grupo (C_g), correspondiente al avance de un grupo de olas. En aguas profundas la envolvente va rezagada con respecto a las ondas individuales y se dice que las olas viajan en paquetes de energía. En aguas someras, la velocidad de grupo y la velocidad de fase son iguales.

Con estas consideraciones se obtienen las siguientes expresiones definitorias del oleaje regular según la teoría lineal de ondas o de Airy:

Relative Depth	Shallow Water $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$	Transitional Water $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	Deep Water $\frac{d}{L} < \frac{1}{2}$
1. Wave profile	Same As >	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \theta$	< Same As
2. Wave celerity	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
3. Wavelength	$L = T\sqrt{gd} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0 T$
4. Group velocity	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right] C$	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$
5. Water particle velocity			
(a) Horizontal	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \theta$	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos \theta$
(b) Vertical	$w = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \sin \theta$	$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin \theta$
6. Water particle accelerations			
(a) Horizontal	$a_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$a_x = 2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin \theta$
(b) Vertical	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$	$a_z = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos \theta$
7. Water particle displacements			
(a) Horizontal	$\xi = -\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin \theta$
(b) Vertical	$\zeta = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos \theta$
8. Subsurface pressure	$p = \rho g(\eta - z)$	$p = \rho g\eta \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g\eta e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} - \rho g z$

Tabla III.1 Parámetros característicos del oleaje según la Teoría Lineal de Ondas o de Airy. *Fuente: Coastal Engineering Manual (2002)*

Para la formulación del potencial energético se deduce primero la expresión de la energía de una onda individual, teniendo en cuenta que ésta se divide en energía potencial y energía cinética.

Se define la **Energía potencial (E_p)** de una columna de agua de masa dm , relativa al fondo, como:

$$dE_p = dm \cdot g \cdot z \quad dm = \rho(h + \eta) \cdot dA$$

$$z = \frac{h + \eta}{2}, \text{ altura al centro de gravedad de la masa (m)}$$

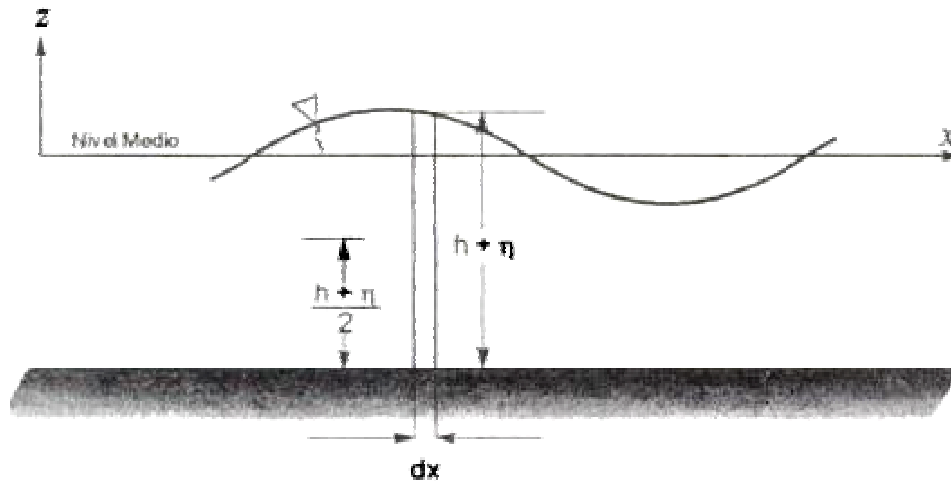


Figura III.4 Esquema para la deducción de la energía potencial de una ola. Fuente: Petroni, R.V. (2005)

Entonces, para una ola individual, la energía potencial media a lo largo de una longitud de onda es:

$$E_p = \int_0^L \rho g \int_{-h}^{h+\eta} (h+\eta) dz dx = \frac{\rho g}{2} \int_0^L (h^2 + 2h\eta + \eta^2) dx$$

Teniendo en cuenta que la profundidad relativa al fondo (h) es una constante que se refiere al nivel medio del mar en reposo, la integral sólo depende del perfil de la superficie del mar y queda la siguiente ecuación genérica para la energía potencial media:

$$\bar{E}_p = \frac{\rho g}{L} \left[\frac{1}{2} h^2 L + h \int_0^L \eta dx + \frac{1}{2} \int_0^L \eta^2 dx \right]$$

En la teoría lineal de ondas, la ecuación de la forma del perfil de la superficie es:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

Sustituyéndola en la ecuación genérica, aparecen las siguientes integrales a resolver:

$$\int_0^L \eta dx = \int_0^L \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) dx = \frac{H}{2} \left[\sin(kx - \omega t) \right]_0^L = \frac{H}{2} [\sin(kL - \omega t) - \sin(-\omega t)] = 0$$

$$\int_0^L \eta^2 dx = \int_0^L \left(\frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \right)^2 dx = \frac{H^2}{4} \int_0^L \cos^2(kx - \omega t) dx = \frac{H^2}{4} \int_0^L \left(\frac{\cos 2(kx - \omega t)}{2} + \frac{1}{2} \right) dx = \frac{H^2}{8} L$$

Sustituyendo la solución de las integrales en la ecuación genérica, se obtiene la siguiente expresión:

$$\bar{E}_p = \frac{\rho g}{2} h^2 + \frac{1}{16} \rho g H^2$$

Donde el primer sumando hace referencia a la energía producida por el líquido en reposo (por lo tanto, en este caso es nulo) y el segundo sumando hace referencia a la energía producida por la onda.

De manera que la expresión de la energía potencial media de una ola individual, queda expresada como:

$$\bar{E}_p = \frac{1}{16} \rho g H^2$$

Dicha expresión sólo depende de la altura de ola (H) y no tiene en cuenta la profundidad respecto al fondo (h), de lo que se deduce que es válida para cualquier dominio de trabajo (aguas profundas, aguas intermedias y aguas someras).

Por otra parte, se define el diferencial de **energía cinética (Ec)** relativo al movimiento de las partículas de agua, asociado a una parcela diferencial de un fluido de masa dm, como:

$$d(Ec) = dm \cdot \frac{u^2 + w^2}{2} = \rho \cdot dx \cdot dz \cdot \frac{u^2 + w^2}{2}$$

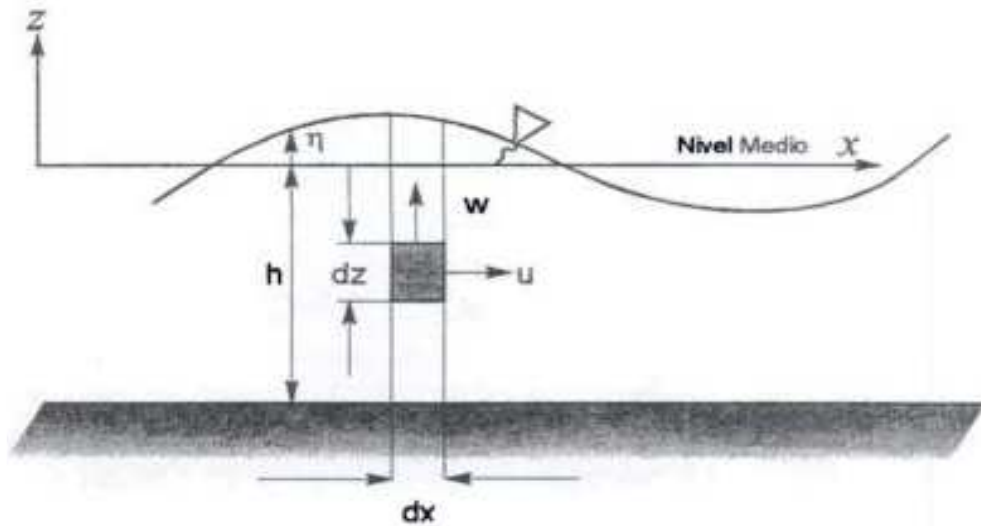


Figura III.5 Esquema para la deducción de la energía cinética de una ola. Fuente: Petroni, R.V. (2005)

Para hallar la expresión genérica de la energía cinética media por unidad de superficie, se integra y divide la ecuación diferencial, en el dominio de la longitud de onda:

$$\bar{E}_c = \frac{1}{L} \int_{x-\pi}^{x+\pi} \int_{-\eta}^{\eta} dE_c = \frac{1}{L} \int_{x-\pi}^{x+\pi} \int_{-\eta}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} dx dz$$

La expresión genérica para la energía cinética es:

$$\bar{E}_c = \frac{\rho}{2L} \int_{x-\pi}^{x+\pi} \int_{-\eta}^{\eta} (u^2 + w^2) dx dz$$

Según la teoría lineal de ondas o de Airy, el movimiento de las moléculas de agua se expresa a partir de las componentes horizontal (u) y vertical (w) de la velocidad orbital, siendo:

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\Pi(z+d)/L]}{\cosh(2\Pi d/L)} \cos \theta$$

$$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\Pi(z+d)/L]}{\cosh(2\Pi d/L)} \sin \theta$$

Sustituyendo las velocidades de las moléculas de agua en la expresión genérica de la energía cinética media, queda la siguiente ecuación a resolver:

$$\bar{E}_c = \frac{\rho}{2L} \left(\frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{1}{\cosh(kh)} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-\eta}^{\eta} [\cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx-wt) + \sinh^2 k(h+z) \sin^2(kx-wt)] dz dx =$$

$$= \frac{\rho}{2L} \left(\frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{1}{\cosh(kh)} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-\eta}^{\eta} \frac{1}{2} [\cosh 2k(h+z) + \cos 2(kx-wt)] dz dx$$

$$\int_x^{x+L} \int_{-\eta}^{\eta} [\cosh 2k(h+z)] dz dx = \frac{\sinh 2kh}{2k} L$$

$$\int_x^{x+L} \int_{-\eta}^{\eta} [\cos 2(kx-wt)] dz dx = 0$$

$$\bar{E}_c = \frac{\rho}{2L} \left(\frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{1}{\cosh(kh)} \right)^2 \frac{\sinh 2kh}{4k} L = \frac{1}{16} \rho g H^2 \frac{gk}{w^2} \tanh kh$$

Por otro lado, a partir de la definición de la relación de dispersión se obtiene la siguiente igualdad:

$$c = \frac{L}{T} = \frac{w}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \rightarrow \frac{gk}{w^2} \tanh kh = 1$$

De manera que la energía cinética media por unidad de superficie de una ola individual, es:

$$\bar{E}_c = \frac{1}{16} \rho g H^2$$

De nuevo, la expresión obtenida es válida para cualquier dominio de trabajo. Finalmente, la energía total media de una ola individual se calcula como:

$$\bar{E} = \bar{E}_c + \bar{E}_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 + \frac{1}{16} \rho g H^2$$

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

Una vez obtenida la expresión de la energía, ya se puede deducir la velocidad a la que ésta se transmite. Es decir, el **potencial de energía (P)** que una onda transfiere al agua quieta.

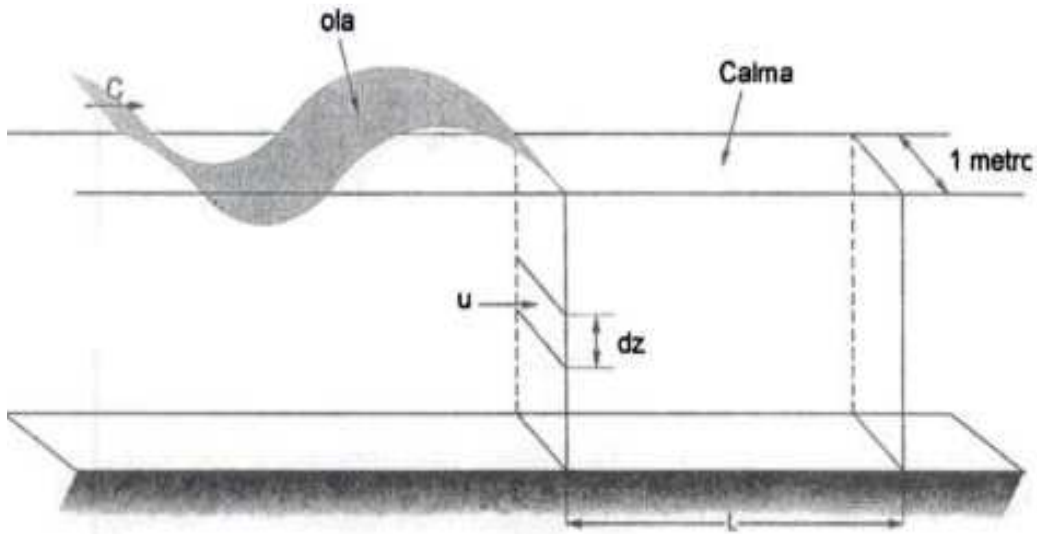


Figura III.6 Esquema para la deducción del potencial de energía de una ola. Fuente: Petroni, R.V. (2005)

Para ello, se considera la situación de un frente de onda que alcanza al agua en reposo (figura III.6).

Para la determinación del trabajo que se realiza a través de la superficie vertical del frente de onda, previamente se plantea el esquema de fuerzas que actúa sobre ésta. De éste se deduce que la única fuerza que ejerce trabajo es la presión dinámica (p_D) producida por la onda, ya que la presión estática queda compensada a ambos lados de la superficie considerada. Así el trabajo que produce esta fuerza por unidad de tiempo es igual a:

$$dP = \frac{dT}{dt} = p_D u dz$$

El potencial medio de energía de una ola individual, se halla integrando la expresión anterior y promediándola en el tiempo:

$$\bar{P} = \frac{1}{LT} \int_{-h}^{\eta} \int_t^{t+T} \int_x^{x+L} p_D u dx dt dz$$

Para la definición de la presión dinámica, se recurre a la expresión del campo de presiones de una onda progresiva según la teoría lineal. Éste se determina a partir de la ecuación de Bernouilli particularizada para el caso de fluido ideal y con la velocidad potencial adecuada:

$$\text{con } \phi = \frac{Hg}{2\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t)$$

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \omega t)$$

El primer sumando hace referencia a la presión hidrostática y el segundo sumando hace referencia a la presión dinámica, por lo que:

$$p_D = -\rho \frac{\delta \phi}{\delta t} = -\rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \omega t)$$

Sustituyendo la presión dinámica y la componente horizontal de la velocidad orbital, en la expresión genérica del potencial medio de energía, queda:

$$\bar{P} = \frac{1}{LT} \int_{-h}^{\eta} \int_t^{t+T} \int_x^{x+L} \left[-\rho \frac{Hg}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \omega t) \right] \left[\frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t) \right] dx dt dz$$

$$\bar{P} = \frac{\rho g w}{4k} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \frac{(2kh + \sinh 2kh)}{\sinh 2kh}$$

$$\bar{P} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{w}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right]$$

De la última expresión se deduce que el potencial medio es igual a la energía total media de una ola individual por su velocidad de grupo. Es decir, queda demostrado que la energía se traslada con la velocidad de grupo y no con la velocidad de fase.

$$\bar{P} = \bar{E} \cdot C \cdot n = \bar{E} \cdot C_g$$

En aguas profundas ($h > L/2$), la energía se traslada con la mitad de la velocidad con la que lo hacen las ondas:

$$C_o = \frac{gT}{2\pi}$$

$$C_g = \frac{C_o}{2} \rightarrow \bar{P} = \bar{E} \frac{C_o}{2}$$

Entonces, el potencial medio de energía para una ola individual se calcula como:

$$\bar{P} = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T$$

Teniendo en cuenta que la altura de ola (H) se mide en metros, el periodo (T) se mide en segundos, y tomando los valores de $\rho = 1.028 \text{ kg/m}^3$ y $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, queda una expresión tan sencilla como:

$$\underline{\bar{P} = 0.985 H^2 T [kW / m]}$$

Es decir, el potencial medio de energía de una ola individual idealizada (onda senoidal de amplitud constante y periodo y longitud de onda bien definidos), varía con el cuadrado de la altura de ola (H) y con el periodo del movimiento (T). Por lo tanto, la disminución de su altura con la profundidad (h) es importante en el estudio de la distribución de la energía en las olas en profundidad.

Para el caso de aguas someras ($h < L/25$), no se tiene en cuenta la deducción del potencial medio, ya que, tal y como se comentó en la introducción de este capítulo, la teoría lineal de ondas o de Airy no funciona bien para dominios cercanos a la costa.

3.2.2 Según la teoría no lineal de Stokes de 2º orden

La teoría de Stokes desarrolla soluciones en series (donde el primer orden de aproximación es idéntico a la solución lineal) de segundo, tercer y orden superior.

En el caso de Stokes de segundo orden, el perfil de las ondas presenta crestas más altas y estrechas y valles más aplanados y largos, que se aproximan a la forma real que tienen las olas cuando entran en aguas intermedias y someras. En este caso, la ecuación de la forma del perfil de la superficie del mar es:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - wt) + \frac{\Pi}{2} \frac{H^2}{L} \frac{\cosh(kh)[2 + \cosh(2kh)]}{(\sinh(kh))^3} \cos[2(kx - wt)]$$

En cuanto al movimiento de las moléculas del agua, las trayectorias orbitales a las que se ven sometidas, se consideran abiertas; de manera que se tiene en cuenta el transporte neto de las moléculas en la dirección de propagación del oleaje.

En este caso, las componentes horizontal y vertical de la velocidad orbital de las moléculas de agua son:

$$u = \frac{\Pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - wt) + \frac{3}{4} \left(\frac{\Pi H}{L} \right) C \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - wt)$$

$$w = \frac{\Pi H}{T} \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - wt) + \frac{3}{4} \left(\frac{\Pi H}{L} \right) C \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - wt)$$

Y el transporte neto de las partículas de agua en la dirección de propagación del oleaje se describe mediante la velocidad de deriva de Stokes:

$$U_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\Pi H}{L} \right)^2 C \frac{\cosh 2k(h+z)}{2 \sinh^2 kh}$$

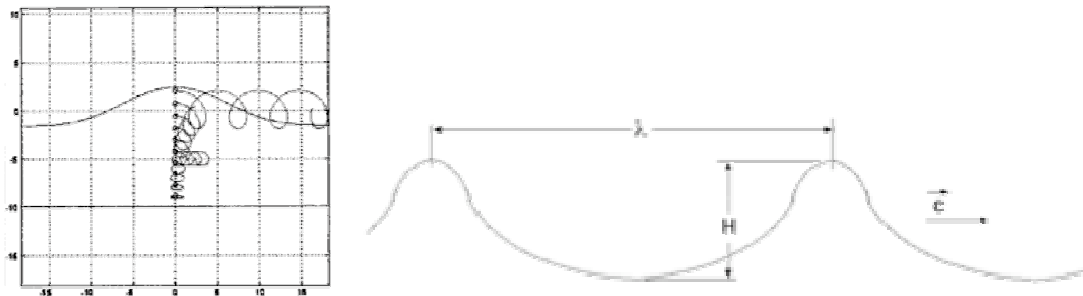


Figura III.7 Esquema de definición del perfil del oleaje y del movimiento de las moléculas de agua, según la Teoría de Stokes. Fuente: *Coastal Engineering Manual* (2002)

Para la deducción del potencial medio de energía de una ola individual, se procede como en el apartado anterior.

Previamente se deduce la energía total media de una ola individual a partir de las expresiones genéricas de la energía potencial y de la energía cinética media, hallada para la teoría lineal de ondas o de Airy, y particularizadas mediante los parámetros característicos del oleaje según la Teoría de Stokes de segundo orden.

Teniendo en cuenta que esta teoría se ajusta mejor a la realidad del perfil de la superficie del mar en profundidades poco profundas, se simplifican los cálculos suponiendo un dominio de aguas intermedias.

La energía total media de una ola individual es:

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \left(1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{\left(\frac{2\pi}{L} \right)^4 h^6} \right)$$

La teoría de Stokes de segundo orden modifica la energía total media obtenida según la teoría lineal de ondas o de Airy, mediante un factor de corrección dependiente de la profundidad (h).

Este factor, al estar sumado por la unidad, asegura que la energía obtenida según la teoría de Stokes de segundo orden, siempre será igual o mayor que la obtenida según la teoría lineal de ondas o de Airy: para el caso de grandes profundidades (grandes valores de h) el factor corrector tiende a cero, y por lo tanto, las dos teorías coinciden.

La misma conclusión se puede extraer también para el potencial energético.

El potencial medio de energía de una ola individual según la teoría lineal de Stokes de segundo orden, se calcula como:

$$\bar{P} = C_g \bar{E}$$

$$\bar{P} = C_g \frac{1}{8} \rho g H^2 \left(1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{\left(\frac{2\pi}{L} \right)^4 h^6} \right)$$

Para la definición de las expresiones de la velocidad de grupo y de la celeridad, en el dominio de aguas intermedias, se recurre a la teoría lineal de ondas o de Airy:

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4kh^2}{\sinh(4kh)} \right] C$$

$$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

En la expresión de la velocidad de grupo se observa que el número de onda (n) es una variable que depende de la profundidad en que se trabaje (h), dentro del intervalo definido como aguas intermedias ($\frac{1}{25} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$).

3.3 Cálculo del potencial en el Oleaje Irregular

En realidad, el oleaje es un fenómeno complejo y aleatorio, tanto en el espacio como en el tiempo. Si se realiza un registro de los desplazamientos del mar en un mismo punto, a lo largo del tiempo, se observa un esquema como el de la figura III.8, muy alejado del esquema que supone el oleaje regular, en el cual la onda mantiene siempre constantes todas sus variables.

Además si se comparan los registros obtenidos en puntos próximos, se observa que las ondas sólo se parecen en sus propiedades estadísticas medias, es decir, el oleaje se desarrolla en el tiempo de una manera controlada por leyes probabilísticas.

Una consideración a tener en cuenta en la descripción del oleaje como un fenómeno irregular, es cómo se gestionan los datos registrados.

En el caso concreto de la evaluación del potencial energético, se trabaja con descripciones del oleaje a corto plazo que consisten en cortar los registros de oleaje en intervalos de tiempo relativamente cortos (1 hora), pero con suficiente duración para dar fiabilidad a la estadística (*régimen medio*). A cada uno de estos registros se les denomina *estados de mar*.

Por lo tanto, lo que se evalúa es el potencial medio de energía de un estado de mar concreto y esto se puede hacer mediante la descripción geométrico-estadístico y la descripción espectral del oleaje.

La descripción a largo plazo del oleaje (*régimen extremal*) está vinculada con el análisis del comportamiento de la planta de energía del oleaje, a nivel de su funcionalidad y de seguridad.

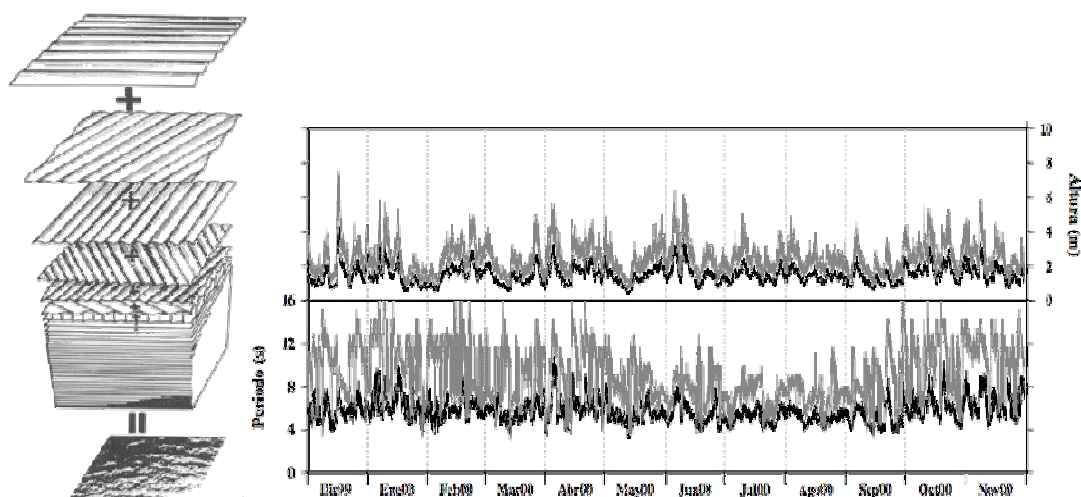


Figura III.8 Descomposición del oleaje. Registro de la alturas de ola y periodos, durante dic.1999-nov. 2000, por la boya de Gran Canaria. Fuente: www.puertos.es

3.3.1 Según la descripción estadístico-geométrica del oleaje

Consiste en la caracterización del oleaje a partir de una serie de variables denominadas parámetros estadísticos.

Para la obtención de estos parámetros se descompone un registro de olas sucesivas, en olas individuales que se pueden definir mediante *el criterio de paso ascendente por cero*:

partiendo de un nivel de referencia cero, se define una ola como la situada entre dos pasos ascendentes por cero.

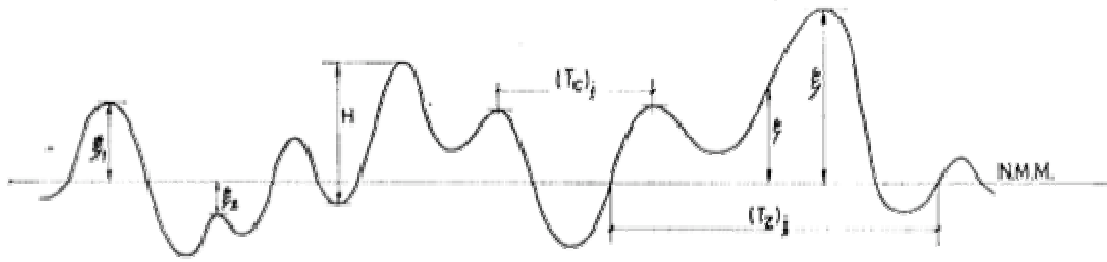


Figura III.9 Esquema de la definición de los parámetros de un registro, con el criterio de paso ascendente por cero.
Fuente: Coastal Engineering Manual (2002)

Para cada ola individual se obtiene una lectura de su altura H_i y de su periodo T_i . El perfil de la superficie del mar de una ola individual se describe mediante la teoría lineal de ondas o de Airy, como:

$$\eta(t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

De manera que en un registro de N olas se obtiene una serie de alturas de ola (H_1, H_2, \dots, H_N) y de periodos de ola (T_1, T_2, \dots, T_N). Y el perfil de la superficie del mar de todos los campos de oleaje se describe por la suma de sus términos sinuosidales, en serie de Fourier, como:

$$\eta_N(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x - \omega_i t) \quad \text{donde } a \text{ es la amplitud de las olas } (1/2H_i).$$

A partir de los N valores de alturas de ola y de periodos registrados, se obtienen los siguientes parámetros estadísticos que caracterizan un registro cualquiera del oleaje:

H_{rms} Altura de ola media cuadrática

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2}$$

H_S Altura de ola significativa

Es el promedio del tercio mayor de las alturas de ola en un registro de N olas.

H_{max} Altura de ola máxima

Es el valor mayor de las H_i .

T_Z Periodo medio estadístico

$$T_Z = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N}$$

T_S Periodo significativa

Es la media aritmética de los periodos asociados al tercio de olas más altas de un registro de oleaje.

T_c Periodo entre crestas

Es el intervalo de tiempo que transcurre entre dos crestas consecutivas.

r Parámetro de irregularidad del registro

$$r = \frac{T_c}{T_z}$$

Para la deducción del potencial medio de energía según la descripción geométrico-estadística del oleaje, se parte de la expresión:

$$\bar{P} = C_g \bar{E}$$

En este caso, la energía total media y la velocidad de grupo serán los valores promediados para un registro de N olas.

Para la estimación de la energía total media asociada a un registro de N olas, se parte de la expresión obtenida para la teoría lineal de ondas o de Airy, referente a una ola individual e ideal:

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

En un registro de N olas, la energía total media asociada es:

$$\bar{E}_N = \frac{1}{N} \bar{E}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{8} \rho g H_i^2 = \frac{1}{N} \frac{1}{8} \rho g \sum_{i=1}^N H_i^2 = \frac{1}{8} \rho g \frac{\sum_{i=1}^N H_i^2}{N} = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2$$

La celeridad de grupo promedio de un registro de N olas, particularizada para el dominio de aguas profundas, es:

$$\bar{C}_{gN} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{g T_i}{4\pi}}{N} = \frac{g}{4\pi} \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} = \frac{g T_z}{4\pi}$$

Por lo tanto, para un estado de mar concreto, caracterizado por N registros de alturas de olas (H_i) y periodos (T_i), el potencial medio de energía por unidad de superficie se calcula como:

$$\bar{P} = \bar{E}_N \cdot \bar{C}_{gN} = \frac{\rho g^2}{32\pi} H_{rms}^2 T_z$$

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2}{32\pi} H_{rms}^2 T_z$$

Es decir, el potencial medio de energía (por unidad de anchura) es proporcional al cuadrado de la altura de ola media cuadrática y del periodo medio estadístico.

Y se deduce que el cuadrado de la altura media cuadrática (H_{rms}^2) es una medida de la energía media del registro de las olas.

Teniendo en cuenta que la altura de ola media cuadrática (H_{rms}) se mide en metros, el periodo medio estadístico (T_Z) se mide en segundos, y tomando los valores de $\rho=1.028\text{kg/m}^3$ y $g=9,81\text{m/s}^2$, queda la siguiente expresión:

$$\bar{P} = 0.985 H_{rms}^2 T_Z [kW / m]$$

Se observa que la expresión del potencial medio de energía según la descripción geométrico-estadística del oleaje, es similar a la expresión obtenida según la descripción lineal del oleaje; salvo que en este caso la altura de ola y el periodo son los representativos de un registro de N olas reales (y no de una ola individual ideal).

Además de la cuantificación energética de un registro de olas, otro dato de interés puede ser cómo queda distribuida la energía en la longitud de dicho registro (dominio temporal).

Teniendo en cuenta que según la descripción estadístico-geométrica del oleaje, la expansión del registro de olas es en serie de Fourier y que la energía media de un tren de ondas es proporcional al cuadrado de la altura media cuadrática del registro; se obtiene una distribución discreta de los resultados, conocida vulgarmente como tipo peine, por su forma.

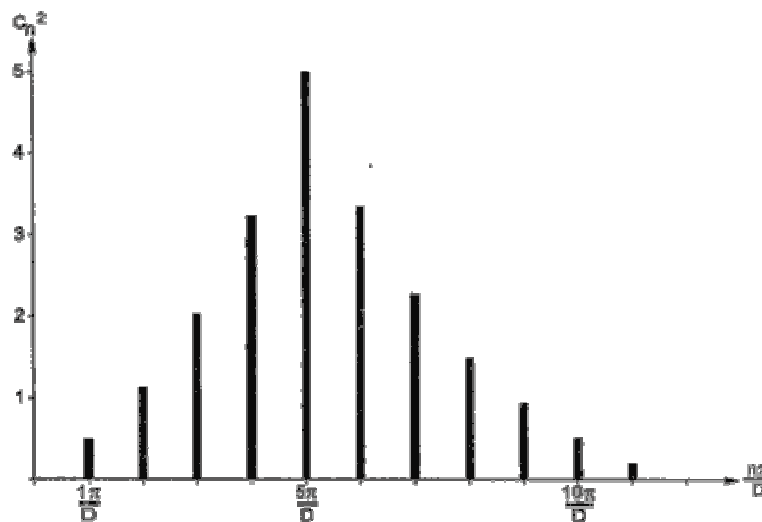


Figura III.10 Espectro de energía discreto tipo peine. Fuente: Petroni, R.V. (2005)

En la figura III.10 se muestra un espectro de energía de las olas, donde el eje de abscisas representa las frecuencias determinadas en que se distribuye la energía, como submúltiplos de la longitud del registro D .

Este tipo de distribución supone el inconveniente de establecer una distribución discreta de las frecuencias, cuando en realidad, las ondas que componen un estado de mar poseen períodos que varían en forma continua.

Si el objetivo es poder trabajar con toda la información, para obtener resultados lo más cercanos posibles a la realidad; parece más conveniente utilizar otro tipo de función, que describa la superficie libre teniendo en cuenta el oleaje como un fenómeno continuo.

Entonces, en lugar de expandir el registro de olas en serie de Fourier, se hace mediante la integral de Fourier, de manera que la variación de la superficie del perfil de la superficie del mar a través del tiempo, se describe como:

$$\eta(t) = \int_0^{\infty} A(w) e^{iwt} dw$$

Donde $A(w)$ representa la función continua de las alturas de las olas componentes del registro, por unidad de frecuencia.

Esto es lo que se conoce como la descripción espectral del oleaje y resulta la más adecuada cuando se trabaja con él.

A continuación se hace una breve explicación de su consistencia y de cómo se deduce el potencial medio de energía a partir de ésta.

3.3.2 Según la descripción espectral del oleaje

En este caso se considera al oleaje como una señal compleja (al igual que otros fenómenos como el ruido) que puede caracterizarse mediante su espectro de energía ó función de densidad espectral.

Para un estado de mar concreto, la *función de densidad espectral* describe la distribución de su energía, en cada intervalo de frecuencias angulares y de direcciones.

Concretamente, en función del dominio en que se trabaje, se tiene:

Función de densidad espectral escalar $S(w)$ de la superficie libre del mar: representa la energía total del oleaje, promediada en el tiempo, existente en cada intervalo de frecuencia Δw . Se obtiene a partir del registro y análisis de un solo parámetro.

Función de densidad espectral direccional $S(w, \theta)$ de la superficie libre del mar: representa la energía total del oleaje promediada en el tiempo, existente en cada intervalo de frecuencia Δw y en cada intervalo de dirección θ . Se obtiene a partir del registro y análisis de series temporales de varios parámetros (superficie libre, velocidad...).

La relación entre ambas funciones se obtiene integrando la función de densidad espectral direccional en todo el arco de direcciones:

$$S(w) = \int_{-\Pi}^{\Pi} S(w, \theta) d\theta$$

A partir de las funciones de densidad espectral, se obtienen los parámetros espectrales, que dan información de las características del registro analizado:

Función de densidad espectral escalar

$$S(w)$$

Momento de orden n

$$m_n = \int_0^{\infty} w^n S(w) dw$$

Altura de ola significativa

$$H_{m0} = 4,004 \sqrt{m_0}$$

Periodo medio espectral T_{01}

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} = T_m$$

Periodo medio espectral T_{02}

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

Periodo energético

$$Te = \frac{m_{-1}}{m_0} = T_{-10}$$

Periodo de pico espectral

$$T_p = \frac{2\Pi}{w_p} = \frac{m_{-2}m_1}{m_0^2}$$

Frecuencia media

$$\bar{w} = \frac{m_1}{m_0}$$

Anchura espectral adimensional

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^2 \quad \varepsilon = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Para el cálculo del potencial medio de energía de un estado de mar concreto, se parte de la energía total contenida en éste, la cual se define, como ya se indicó al principio de este apartado, mediante la función de densidad espectral.

Debido a que la mayor parte de la información instrumental existente en la actualidad pertenece a boyas escalares, es preferible trabajar con la función de densidad espectral escalar $S(w)$.

La energía media total por unidad de área, de dicho estado de mar, se obtiene integrando la función de densidad espectral escalar en todo el dominio de frecuencias:

$$\bar{E} = \rho g \int_0^{\infty} S(w) dw$$

La expresión de la celeridad de grupo para el dominio de aguas profundas es:

$$C_{gi} = \frac{gT_i}{4\Pi}$$

Entonces, por definición, el potencial medio de energía de un estado de mar queda de la forma:

$$\bar{P} = \bar{E} \cdot C_{gi,j} = \rho g \int_0^{\infty} S(w) \cdot C_{gi} \cdot dw = \frac{\rho g^2}{4\Pi} \int_0^{\infty} \frac{S(w)}{w} dw$$

Para la resolución de la ecuación anterior puede recurrirse a la definición de los parámetros: periodo energético (T_e) y altura de ola significativa (H_{m0}), mediante los momentos espectrales. Es decir:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

$$H_{m0}^2 = \left(4,004\sqrt{m_0}\right)^2 \cong 16m_0 = 16 \int_0^{\infty} S(w) dw$$

A continuación se sustituyen ambas expresiones en la ecuación genérica obtenida para el potencial medio de energía:

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2}{4\Pi} \int_0^{\infty} \frac{S(w)}{w} dw = \frac{\rho g^2}{4\Pi} m_{-1} = \frac{\rho g^2}{4\Pi} \frac{1}{16} \frac{m_{-1}}{m_0} 16m_0 = \frac{\rho g^2}{64\Pi} T_e H_{m0}^2$$

La altura de ola significativa estadística se puede estimar a partir de los momentos espectrales, cuando las alturas de ola siguen la distribución propuesta por Rayleigh, como:

$$H_s = 4.004\sqrt{m_0} = H_{m0}$$

entonces:

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2}{64\Pi} H_s^2 T_e$$

Teniendo en cuenta que la altura de ola significativa (H_s) se mide en metros, el periodo energético (T_e) se mide en segundos, y tomando los valores de $\rho=1.028\text{kg/m}^3$ y $g=9,81\text{m/s}^2$, queda la siguiente expresión:

$$\bar{P} = 0.493 H_s^2 T_e [kW / m]$$

El periodo energético de un estado de mar representa el periodo que tendría una ola sinusoidal individual con un contenido energético igual al del estado de mar.

Éste no se determina fácilmente mediante las medidas directas del oleaje, sino que se calcula a partir de las expresiones que lo relacionan con las medidas de otros periodos:

$$T_e \approx \alpha' \cdot T_z$$

$$T_e \approx \beta \cdot T_p$$

La relación existente en cada caso depende del modelo espectral que mejor describa el estado de mar con el que se trabaja.

Un modelo espectral es una función de densidad espectral que se ha generado a partir de la predicción de un determinado estado de mar, de manera que representa una situación meteorológica e hidrodinámica concreta. Además, a partir de éste puede obtenerse el potencial medio de energía en función del periodo medio (T_z) o el periodo de pico (T_p) espectrales.

Existen diversos modelos espectrales, denominados con el nombre de su mismo autor, que describen situaciones diferentes.

A continuación se presentan los cuatro modelos espectrales más utilizados por describir estados de mar que mejor se aproximan a la realidad usual. Para cada uno de ellos, se indica la función de densidad espectral escalar y las relaciones existentes entre P- T_z - TP.

- **Espectro de Pierson Moscowitz (1964)**

Pierson y Moscowitz desarrollaron un espectro a partir del estudio de los espectros de oleaje del Atlántico Norte, para representar estados de mar completamente desarrollados generados por viento. El fetch y la duración se consideran infinitas.

Para poder aplicarlo es necesario que el viento sople durante varias horas sobre un área grande con una velocidad relativamente constante antes que la señal del oleaje se registre.

$$S(w) = 0.0004998 \frac{1}{f^5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}]$$

$$\bar{P} = 0.549 H_s^2 T_z [kW / m]$$

- **Espectro ISSC (1964)**

Espectro resultante de una ligera modificación de la forma del espectro propuesto por Bretchneider.

$$S(f) = 0.313 H_s^2 \frac{f_p^4}{f^5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}]$$

$$\bar{P} = 0.595 H_s^2 T_z [kW / m]$$

- **Espectro de Bretchneider-Mitsuyasu (1970)**

Bretchneider propuso una formulación de espectro de banda angosta donde las alturas y los periodos de ola siguen la distribución de Rayleigh. Más tarde, Mitsuyasu hizo un ajuste de coeficientes, aprovechando los datos de olas generadas por viento de un laboratorio y de una bahía, para representar un espectro de fetch limitado.

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^{-4}]$$

$$\bar{P} = 0.441 H_s^2 T_z [kW / m]$$

▪ **Espectro de Jonswap (1973)**

Espectro caracterizado por presentar picos agudos, que representa las olas desarrolladas en un fetch limitado bajo fuertes vientos.

$$S(f) = \beta_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp\left[\frac{-(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right]}$$

$$\beta_J \approx \frac{0.06238}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma]$$

$$\sigma = 0.07 : f \leq f_p$$

$$\sigma = 0.09 : f > f_p$$

$$\bar{P} = 0.458 H_s^2 T_z [kW / m]$$

Por lo que, de manera general, el potencial medio de energía de un estado de mar concreto se calcula, a partir de los datos del espectro particular a producir, como:

$$\bar{P} = \alpha \cdot H_s^2 T_z [kW / m]$$

Donde:

α Constante dependiente del tipo de espectro de energía (Pierson-Moskowitz, Jonswap...) que oscila entre 0.4 y 0.6.

H_s Altura significativa del oleaje, definida a partir de los momentos espectrales.

T_z Periodo medio de paso ascendente por cero, definido a partir de los momentos espectrales.

Igualmente, en el caso de que se tenga información del periodo de la frecuencia del pico de la distribución de energía, se puede utilizar la siguiente relación:

$$\bar{P} = \beta \cdot H_s^2 T_p [kW / m]$$

Donde:

β Constante dependiente del tipo de espectro de energía (Pierson-Moskowitz, Jonswap...) que oscila entre 0.41 y 0.43.

Capítulo IV

Metodología de trabajo

4.1 Introducción

En los anteriores capítulos se ha hecho una presentación de la energía del oleaje, a través de su definición, de su estado del arte y de su contexto actual; así como una valoración de su potencial energético.

Se ha concluido que para la estimación de éste, lo más adecuado es recurrir a la formulación que proponen los modelos espectrales de definición del oleaje, la cual requiere de la deducción de una constante (que se determina a partir del espectro que mejor defina el estado de mar de estudio) y de la obtención de unos datos concretos (medidas directas o indirectas de alturas de olas y de periodos, representativos del oleaje de la zona de estudio).

Hasta aquí el del conocimiento teórico de la energía del oleaje.

En la práctica, cuando se estudia su aprovechamiento, Vidal, C. (1986b) recomienda que el primer paso que se ha de hacer es un análisis de sus disponibilidades, que concreta en:

- Evaluación de la energía del oleaje que aborda la zona de estudio.
- Estudio por direcciones, de dicha energía del oleaje.

Para ello es importante entender la energía del oleaje como un fenómeno variable en función de una determinada escala espacial y temporal.

A nivel espacial, el área de estudio se puede considerar de manera extensiva o como un conjunto de puntos independientes de los que se dispone de datos suficientes, planteándose las siguientes cuestiones:

- Cuál es el potencial total medio de la energía del oleaje de la zona de estudio.
- Cómo queda repartido geográficamente este potencial: interesa conocer los puntos dónde hay mayor concentración de energía.

Paralelamente, Hagerman, G. (2001) cree conveniente el conocimiento de la variación de la energía del oleaje lo largo del tiempo, teniendo en cuenta su comportamiento a diferentes escalas:

- *Ola por ola (segundos)*. En el capítulo anterior se indicó que para el cálculo del potencial de la energía en el oleaje irregular se trabaja con estados de mar.

Aunque un estado de mar pueda quedar descrito mediante una altura de ola y un periodo representativos de todo el registro, las alturas y periodos de olas individuales y consecutivas pueden variar, en mayor o menor medida, en función de la intensidad del oleaje. En la figura IV.1 se muestra un ejemplo concreto de la disparidad de potenciales que se pueden observar entre dos olas consecutivas.

- *A nivel de grupos de olas (minutos)*. El fenómeno del oleaje ocurre en grupos de olas

sucesivas, con alturas de olas mayores y menores, alternativamente.

La irregularidad en el perfil de dichos grupos puede entorpecer la demanda energética, que es un fenómeno constante. Es por eso que los dispositivos captadores están diseñados también, para almacenar energía. Es decir, el sistema puede trabajar con un rendimiento predeterminado e independiente de la acción continua y variable del oleaje, pudiendo ser éste mínimo, de manera que se produzca un ahorro que compense el coste del equipo de almacenamiento, y mejorando así la economía general del sistema.

- *A nivel de estados de mar (desde horas hasta días).* Si existía una variación entre los niveles de energía de dos olas consecutivas, obviamente existirá una variación entre ciclos sucesivos de olas, definidos en intervalos de tiempo que van desde horas hasta días.

Es necesario el conocimiento de las estadísticas asociadas a la variabilidad horaria y diaria de la energía del oleaje, ya que rigen el rendimiento del dispositivo captador y por lo tanto, la elección del diseño más adecuado.

Si el equipo está diseñado para trabajar con potenciales del oleaje superiores a los que realmente acontecen, funcionará por debajo de la eficiencia óptima de conversión durante la mayor parte del tiempo, por lo que se estarán subestimando sus posibilidades.

Si por el contrario el equipo está diseñado para trabajar con potenciales del oleaje inferiores a los que realmente acontecen, no podrá aprovecharse gran parte del potencial disponible y trabajará por encima de sus posibilidades la mayor parte del tiempo, lo cual puede producir daños en sus instalaciones.

En consecuencia, existe un rango de trabajo del dispositivo, a tener en cuenta, para su óptima conversión energética (figura IV.1).

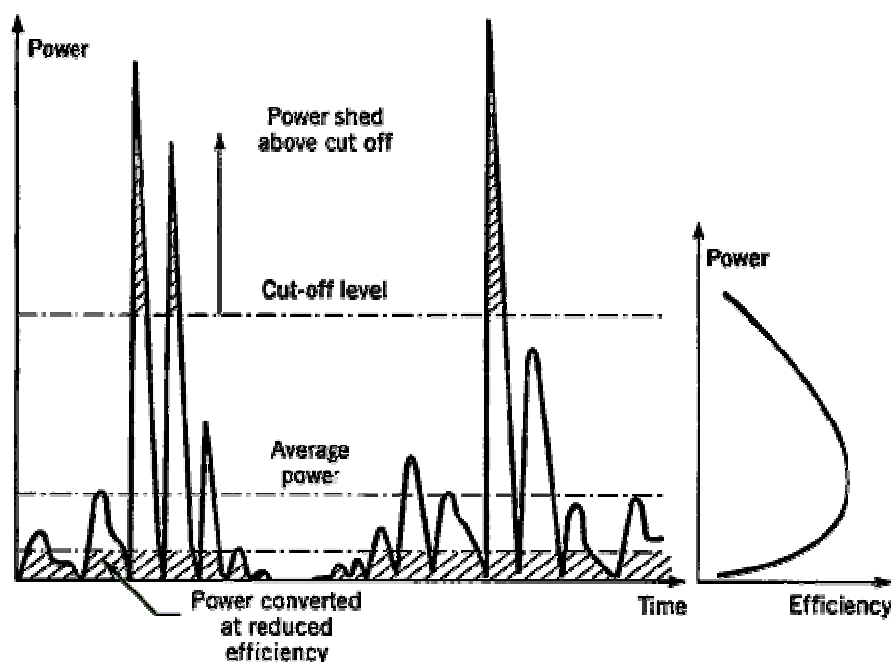


Figura IV.1 Influencia de la variabilidad horaria y diaria del potencial de energía, en la elección del dispositivo para la conversión energética. Fuente: Hagerman, G. (2001)

- *A nivel estacional (meses).* Los temporales son más frecuentes e intensos durante el invierno, pudiendo ser la media mensual de la energía del orden de tres a cinco veces superior que los promedios mensuales de verano. Este hecho se conoce como carga estacional partida.

En las zonas donde la demanda energética pico suele darse en los meses invernales (sobretudo por el uso de las calefacciones) o en las zonas donde el clima es más frío (el caso concreto del norte de Europa), la carga estacional partida resulta competitiva.

Sin embargo, si la demanda pico aparece en los meses estivales (por el uso de los aparatos refrigerantes o el caso concreto de la ciudad de California), la carga estacional partida resulta pobre.

- *A nivel de la vida útil de la planta energética (años).* El conocimiento de las estadísticas anuales es necesario para sopesar las expectativas económicas futuras de la implantación de una planta para el aprovechamiento de la energía del oleaje.

Lo más preciso sería poder disponer de información del mayor número de años posibles para tener un historial significativo del oleaje en la zona de estudio que permita hacer un diagnóstico preciso. Sin embargo, en algunos casos se puede recurrir al registro de pocos años sucesivos (como por ejemplo en la zona norte de California, donde el potencial medio anual de la energía del oleaje puede variar en un 50% de un año para otro).

Además, interesa desarrollar representaciones de los datos energéticos a largo plazo para conocer el clima al que estará expuesta la planta durante los próximos 20 o 30 años de vida útil.

Por lo tanto, en función de la escala espacial y temporal de trabajo se obtendrá una información específica que se presentará de la forma que más se adecue a una mejor lectura de los resultados, y que permitirá evaluar (junto con otra serie de información complementaria) la viabilidad energética de la zona de estudio.

En el esquema de cajas de la figura IV.2 se indican las tareas a llevar a cabo para el análisis de las disponibilidades de la energía del oleaje en la zona de estudio. Éste está extraído de la metodología que utiliza Vidal, C. (1996) para evaluar el potencial energético en la costa del País Vasco.

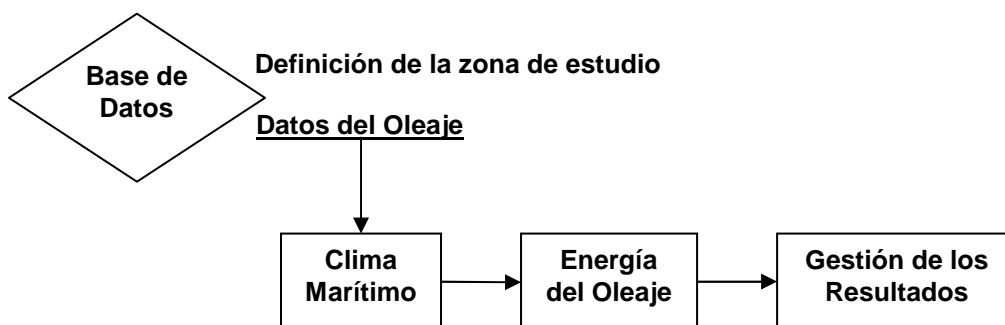


Figura IV.2 Esquema de la metodología de trabajo para el análisis del potencial de la energía del oleaje en la zona de estudio.

Teniendo en cuenta que la finalidad que se persigue cuando se trabaja con la energía del

oleaje (al igual que con el resto de energías), es la de la implantación de una planta energética para su aprovechamiento; los siguientes pasos a llevar a cabo serían el de la evaluación de la viabilidad técnica y económica de su instalación.

Este trabajo se centra únicamente en lo referente al análisis del potencial de la energía del oleaje, con el objetivo de su aplicación a un caso particular.

Para ello, se ha creído conveniente hacer primero una breve descripción de cada una de las tareas a llevar a cabo (figura IV.2), así como dar una serie de orientaciones para la confección de la solución final.

4.2 Bases de Datos

4.2.1 Definición de la zona de estudio

Antes de hacer cualquier tipo de intervención se requiere de un conocimiento detallado de la costa y de la plataforma continental, comprendidas en la zona de estudio.

Para ello se recurre a la observación del entorno exterior y a la obtención de una serie de documentación: cartografía, batimetría local de la costa...

Para el análisis del potencial de la energía del oleaje se definen los *puntos base* y los *puntos objetivo*.

Los puntos base corresponden a las longitudes y profundidades de la zona de estudio, de las cuales se tiene información requerida del oleaje mediante las fuentes de datos. Sin embargo, éstos no tienen por qué coincidir con los puntos donde se quiere evaluar el potencial energético del oleaje. Es por eso que se definen también los puntos objetivo, correspondientes a las longitudes y profundidades de las que se quiere obtener información.

Concretamente, los puntos objetivo corresponden a los puntos de partida considerados potenciales para la implantación de la planta energética. De nuevo, a la hora de estudiar su viabilidad, debido a que ésta depende también de otros factores como los económicos, medioambientales...puede que tampoco acaben resultando ser los óptimos.

En cuanto a la localización de los puntos base, se escogen las fuentes de datos de manera que queden contenidas en la plataforma continental de la zona de estudio o lo más cerca posible de ésta, para que los datos del oleaje que facilitan sean representativos.

4.2.2 Datos del Oleaje

Para la obtención de los parámetros necesarios para el cálculo del potencial medio de la energía del oleaje, se recurre a las fuentes de datos del oleaje.

Para la presentación de las diferentes bases de datos existentes en la actualidad, se ha utilizado un estudio realizado por Tomás, A. et al (2004), a partir de la información facilitada por el Ente Público Puertos del Estado (Ministerio de Fomento).

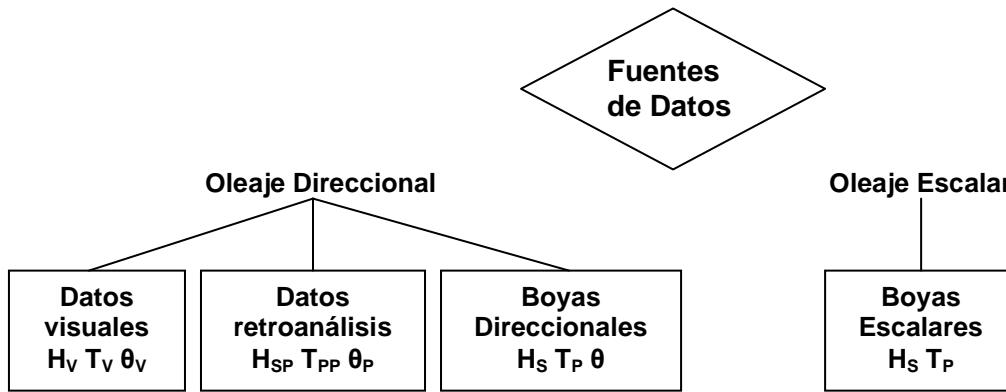


Figura IV.3 Esquema de algunas de las fuentes de datos existentes en la actualidad.

- **Datos instrumentales.** Son los datos obtenidos a partir de instrumentos fondeados en puntos fijos, que pertenecen a redes fijas de medida. Estos instrumentos son boyas escalares o direccionales, que están dotadas de varios sensores para la medida de datos atmosféricos y oceanográficos.

A partir de los datos obtenidos por los sensores, un ordenador contenido en las boyas determina el espectro escalar (boyas escalares) o el espectro direccional (boyas direccionales) que se condensan en una serie de parámetros de estado de mar, que se asume tienen una hora de dirección. Estos parámetros son transmitidos a una central de recogida de datos para su revisión y almacenamiento.

Como resultado del análisis a corto plazo, se almacenan los momentos espectrales y los parámetros estadísticos basados en dichos momentos: H_{m0} , H_{max} , $H_{1/n}$, T_Z , T_P . Si la boya es direccional, se suele indicar además la dirección de la frecuencia de pico θ_P y la dirección media de propagación θ_m .

Ventajas:

Los datos instrumentales se caracterizan por la calidad y la fiabilidad de la información que facilitan. De hecho, a pesar de la serie de inconvenientes que presentan y que se indicaran a continuación, Folley, M. (2006b) afirma que los datos provenientes del ministerio de fomento son tan buenos como los datos provenientes de cualquier otra fuente gratis.

Obviamente son preferibles los datos provenientes de boyas direccionales.

Inconvenientes:

- Las series temporales de datos todavía son demasiado cortas y en algunas de las variables consideradas ni tan siquiera existen registros.
- No miden el periodo energético T_e y tampoco dan información acerca del espectro para calcularlo.
- Los datos de ola significativa se presentan cada 0.5 metros. Teniendo en cuenta que el potencial de la energía depende del cuadrado de la altura de ola significativa, los valores intermedios se calculan de manera imprecisa.
- Dada la profundidad a la que esté situada la boya, pueden no corresponder a un oleaje en aguas profundas.

La base de datos de oleaje existente en nuestro país pertenece a la red costera de Puertos del Estado (RPE). Consta de 18 boyas escalares Waverider (red REMRO) y de 5 boyas direccionales, que proporcionan datos de oleaje en puntos de aguas poco profundas.

Hacer mención también a la base de datos de oleaje existente en nuestra costa catalana: la XIOM (Xarxa d'Instruments Oceànogràfics i Meteorològics). Ésta se compone de diferentes boyas situadas en diversos puntos del litoral catalán y se complementa con las boyas que también dispone Puertos del Estado, en dicha zona (figura IV.4).

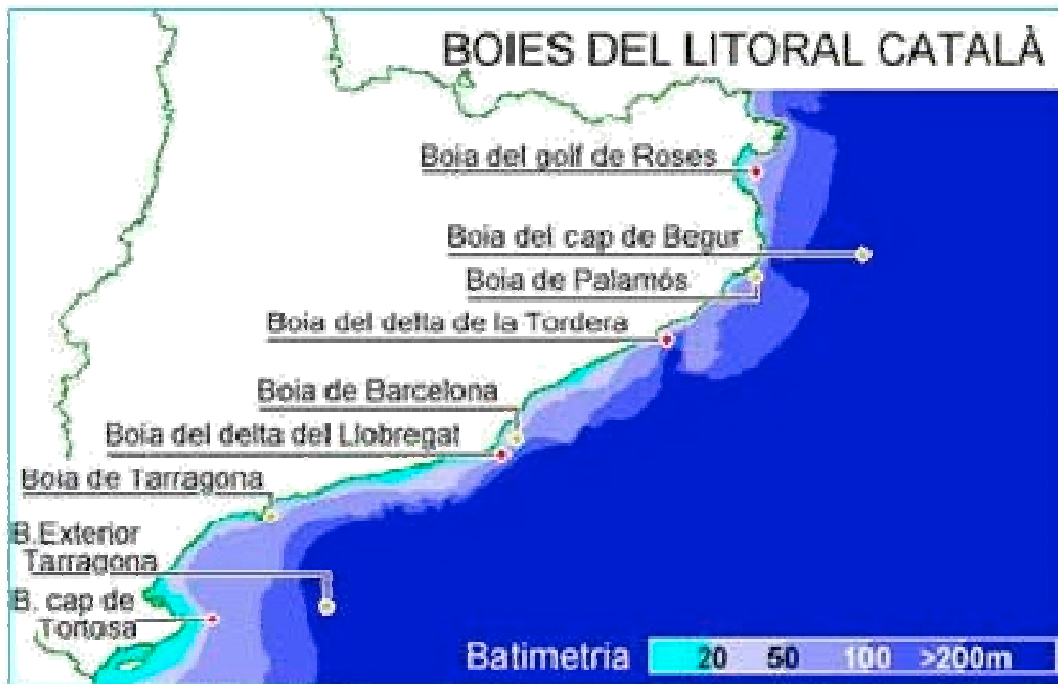


Figura IV.4 Situación de los puntos de medida a lo largo del litoral catalán, mediante instrumentación de la XIOM (puntos rojos) e instrumentación de Puertos del Estado (puntos amarillos). *Fuente:* <http://www.boiescat.org/xiom.asp>

- **Datos de retroanálisis del oleaje.** Son datos generados a partir de la aplicación de los modelos de generación del oleaje con condiciones meteorológicas de tiempo pasado. Esto es posible gracias al desarrollo de los modelos de última generación y a la existencia de información meteorológica digitalizada.

Ventajas:

- El periodo de tiempo al que se extienden los datos (casi 40 años) es muy superior al correspondiente a los datos instrumentales (20 años para las boyas escalares y 10 años para las direccionales).
- Los datos de retroanálisis no contienen huecos derivados de los fallos de los equipos de medida.
- Dada la escasez de datos instrumentales direccionales, los datos de retroanálisis son la mejor fuente disponible en la actualidad de series de larga duración de datos direccionales de temporales.

Inconvenientes:

Debido a las imprecisiones de la previsión meteorológica y del oleaje, los datos de retroanálisis están sometidos a errores y por lo tanto no pueden ser utilizados directamente. Para su uso necesitan ser calibrados con datos instrumentales obtenidos en una zona próxima.

Sin embargo, Guix, M.R. (2006) constata en su tesina de especialidad, que en el caso de trabajar con valores promedios, los modelos numéricos son bastante fiables (contrariamente a lo que sucede cuando se trabaja con valores puntuales) y por lo tanto, se puede trabajar directamente con los datos de retroanálisis.

En la actualidad, existen diferentes bases de datos, entre las cuales destacan los proyectos WASA, WANA, HIPOCAS y SIMAR. Estos difieren en el número de años con que cuenta el registro y en la resolución temporal y espacial en la que se presentan los datos registrados.

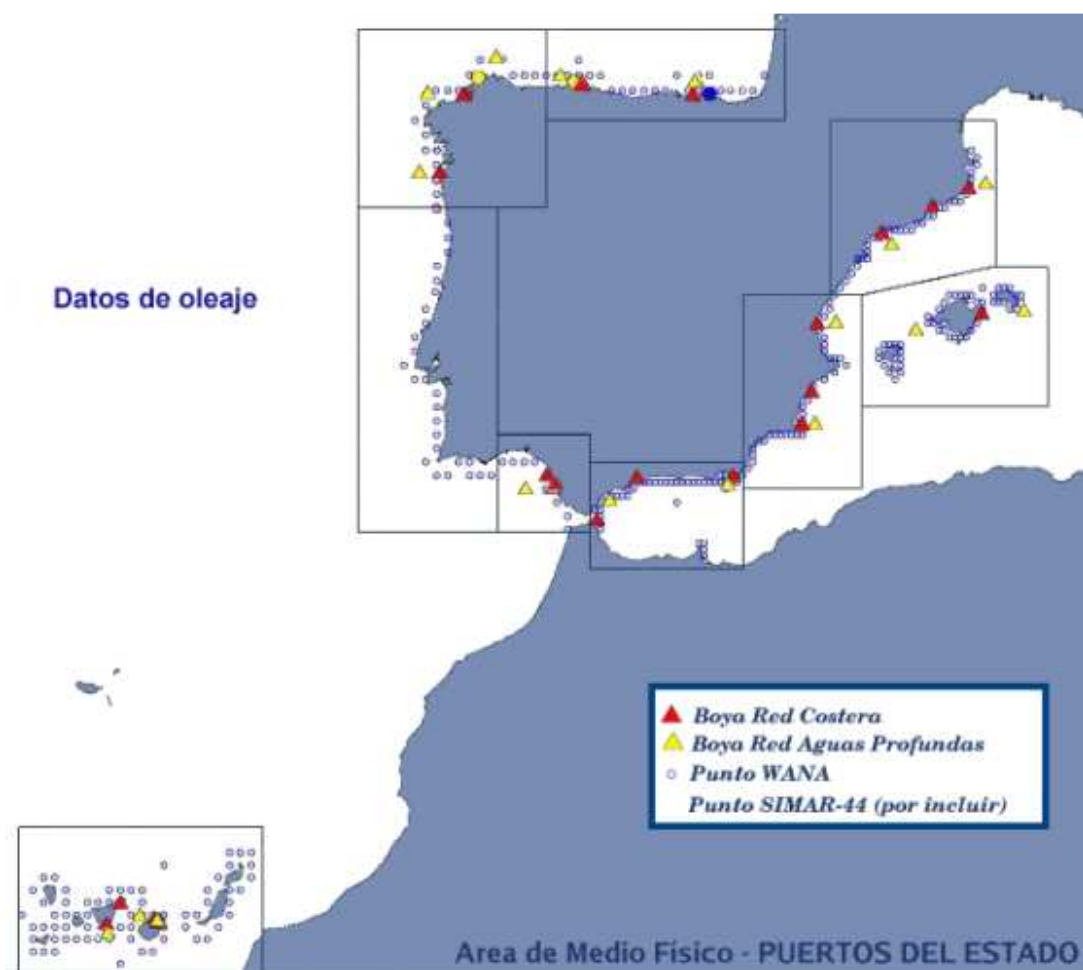


Figura IV.5 Disposición de las fuentes de datos existentes en España. Fuente: www.puertos.es

- Existen también los **datos visuales**, obtenidos a partir de las observaciones desde barcos en rutas. Su principal aplicación es la de servir de complemento a los datos de las anteriores fuentes, para poder tener un panorama más completo sobre el clima marítimo en una zona concreta de la costa.

Inconvenientes

Según Vidal, C. (1986b), los datos visuales infravaloran la energía disponible, debido a que posiblemente los barcos evitan las áreas de gran agitación.

4.3 Clima marítimo

El clima marítimo hace referencia a la estadística de variables climáticas (meteorológicas o derivadas de la meteorología) del área marítima de estudio y se obtiene a partir de los datos registrados mediante alguna de las fuentes de datos descritas en el apartado anterior.

En el caso del potencial energético del oleaje, las variables climáticas que interesan son las que describen las condiciones del oleaje derivadas de las condiciones climáticas, es decir, los espectros direccionales de la energía del oleaje.

Como ya se indicó, la información de oleaje que facilitan las fuentes de datos son los parámetros espectrales H_{m0} , T_z y/o T_p y θ_m de los puntos base. Los espectros direccionales se reconstruyen asumiendo el espectro escalar que mejor describa el oleaje de la zona de estudio.

En función de la extensión de la zona de estudio y de la resolución espacial de los puntos base, puede interesar definir la estadística del oleaje en una nueva serie de puntos (puntos objetivos). Es decir, se escogen las longitudes y las profundidades pertenecientes a la zona de estudio, donde realmente se quiere evaluar el potencial energético del oleaje.

A continuación se propaga el espectro de cada estado de mar de cada punto de la base de datos, a cada uno de los puntos objetivo, mediante un modelo de propagación refracción-difracción. Realizadas las propagaciones del oleaje se obtiene la estadística necesaria para llevar a cabo el estudio del aprovechamiento de la energía del oleaje en la zona de estudio:

- Potencial medio de energía P , anual y mensual.
- Dirección media de energía θ_m , anual y mensual.
- Régimenes medios de H_s , T_z o T_p , θ_m y P , anuales y mensuales.
- Régimenes medios conjuntos, anuales y mensuales
- Régimenes extremos

Toda la estadística en los puntos objetivo se realiza mediante un programa que trabaja sobre esta base de datos.

4.4 Gestión de los resultados

Los resultados obtenidos para la evaluación del potencial energético de una zona concreta, suelen presentarse de forma gráfica de manera que la información pueda visualizarse de una manera más sistemática y resumida, además de correcta, a fin de que pueda utilizarse adecuadamente.

Recordar que se parte del registro de una serie de parámetros mediante unas fuentes de datos, durante un número determinado de años (cada uno de ellos compuesto por doce meses y por cuatro estaciones); y que se trabaja en diferentes localizaciones, el conjunto de las cuales se supone que es representativo de la zona de estudio. De manera que los resultados pueden presentarse en diferentes escalas temporales (anual, estacional, mensual) y/o espaciales (localización puntual ó zona de estudio).

Por lo tanto, la descripción gráfica escogida depende, en cada caso, de las fuentes de datos disponibles y del tipo de información que se quiera mostrar.

En función de esto, los tipos de gráficos más comunmente utilizados son:

- Gráficos aritméticos simples.
- Histogramas.
- Mapas con simbologías específicas, o confeccionados con diferentes técnicas para representar el fenómeno y dar información de éste. Por ejemplo, dando colores o intensidades diferentes en función del grado de afectación del fenómeno en estudio.
- Superficies.

Los *gráficos aritméticos simples* permiten mostrar un mismo tipo de dato y cómo queda distribuido éste en un periodo concreto, permitiendo conocer su evolución.

En el caso de la evaluación del potencial de la energía del oleaje en una zona concreta, mediante la descripción lineal se puede representar de manera muy sencilla su evolución a lo largo del tiempo, a cualquier escala temporal (figura IV.6).

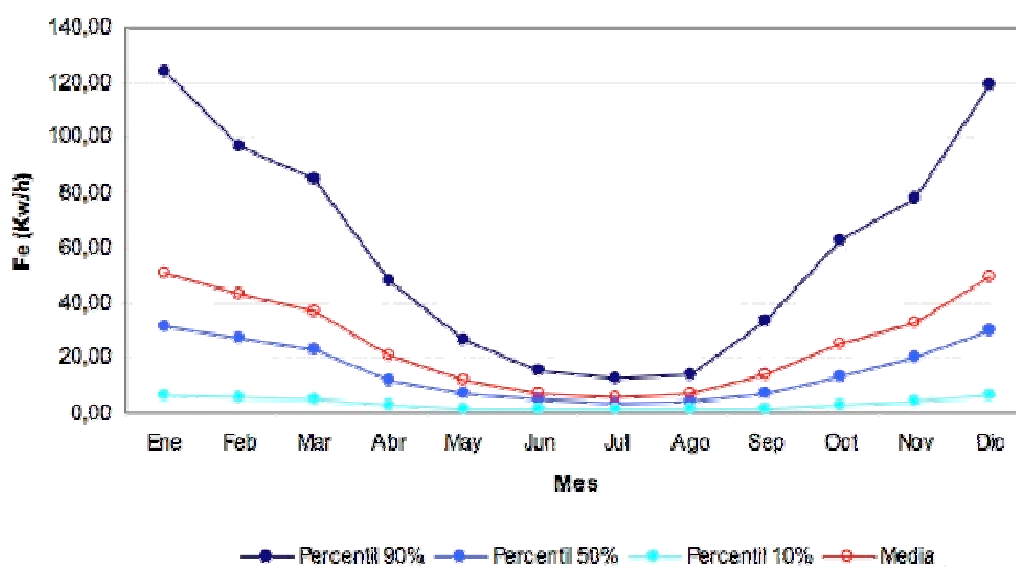


Figura IV.6 Representación lineal del potencial medio mensual de energía, en un punto concreto.
Fuente: Vidal, C. (2006)

Esta información puede referirse a un único punto objetivo (de manera que se obtienen tantas representaciones como número de puntos objetivo se consideran), o a un conjunto de puntos objeto, es decir, a la zona de estudio (obteniendo una única representación).

Por lo tanto, para el estudio de la variabilidad temporal, lo más adecuado es recurrir a los gráficos aritméticos simples; aunque existen una serie de inconvenientes que hay que tener en cuenta y que se indican a continuación.

Cuando se quiere valorar el potencial de la energía del oleaje en cada uno de los puntos objetivo y se quiere realizar también una comparativa entre ellos; la descripción lineal puede resultar muy incómoda ya que obliga a trabajar con diferentes representaciones independientes.

Sí que es verdad que se puede confeccionar una única gráfica donde se muestren todos los puntos objetivos diferenciados por colores, símbolos... Pero según el número de puntos considerado, puede ser que la información sea más difícil de leer y cueste extraer las diferencias.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que las representaciones lineales referentes a un conjunto de datos (zona de estudio o promedios anuales) no son representativas de la oferta energética real de cada punto o de cada estación, sino que se realizan para tener una visión rápida y global del problema, que permita adoptar un primer posicionamiento.

Además, los gráficos aritméticos simples no permiten trabajar con varias variables a la vez, lo que reduce considerablemente la información de salida. O pueden resultar no ser adecuados para el tratamiento de cierta información, como por ejemplo para el estudio de la variabilidad espacial del potencial energético del oleaje.

En estos casos, es preferible recurrir a los mapas y a simbologías específicas, según se verá más adelante.

Los diagramas de barras o histogramas se utilizan para realizar comparativas entre datos discretos (figura IV.7). Por lo tanto, pueden resultar adecuados para representar la variabilidad espacial del área de estudio.

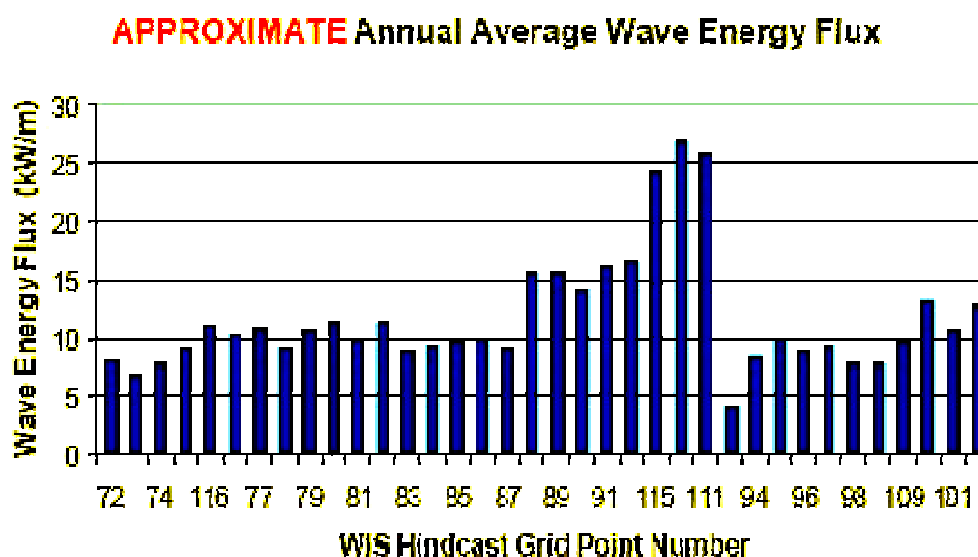


Figura IV.7 Representación del potencial medio anual de energía mediante diagrama de barras. *Fuente: Imagen modificada, de Hagerman, G. (2001)*

Sin embargo, al igual que los gráficos aritméticos simples, los diagramas de barras no permiten trabajar con varias variables a la vez (o resultan muy incómodos para ello).

Un aspecto atractivo a la hora de presentar los resultados, es el poder visualizar la zona de estudio en su contexto.

Cuando se trabaja con los gráficos aritméticos simples o los histogramas, una manera muy perceptiva de localizar los datos, es acompañar las estadísticas mediante un mapa donde se ubiquen los puntos objetivo (figura IV.8) o se indique de alguna otra manera la distribución geográfica considerada (figura IV.9).

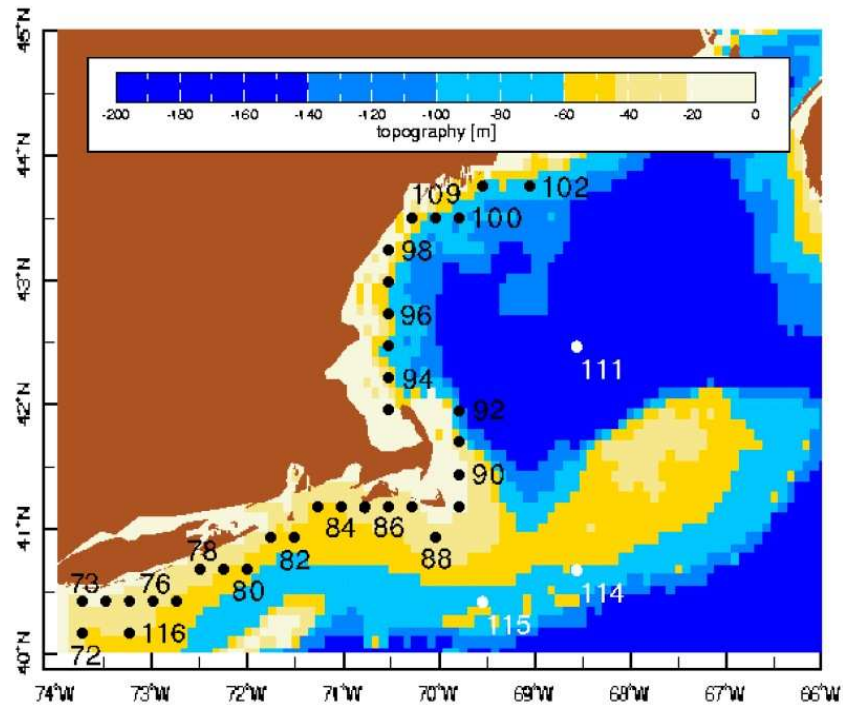


Figura IV.8 Distribución geográfica de los puntos donde se ha representado su potencial energético en la figura IV.6. Fuente: Hagerman, G. (2001)

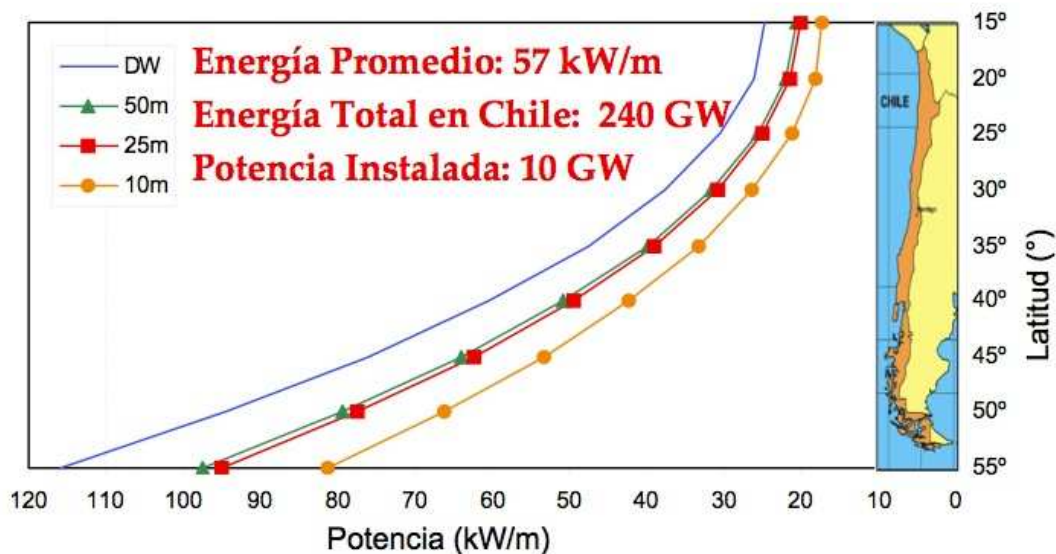


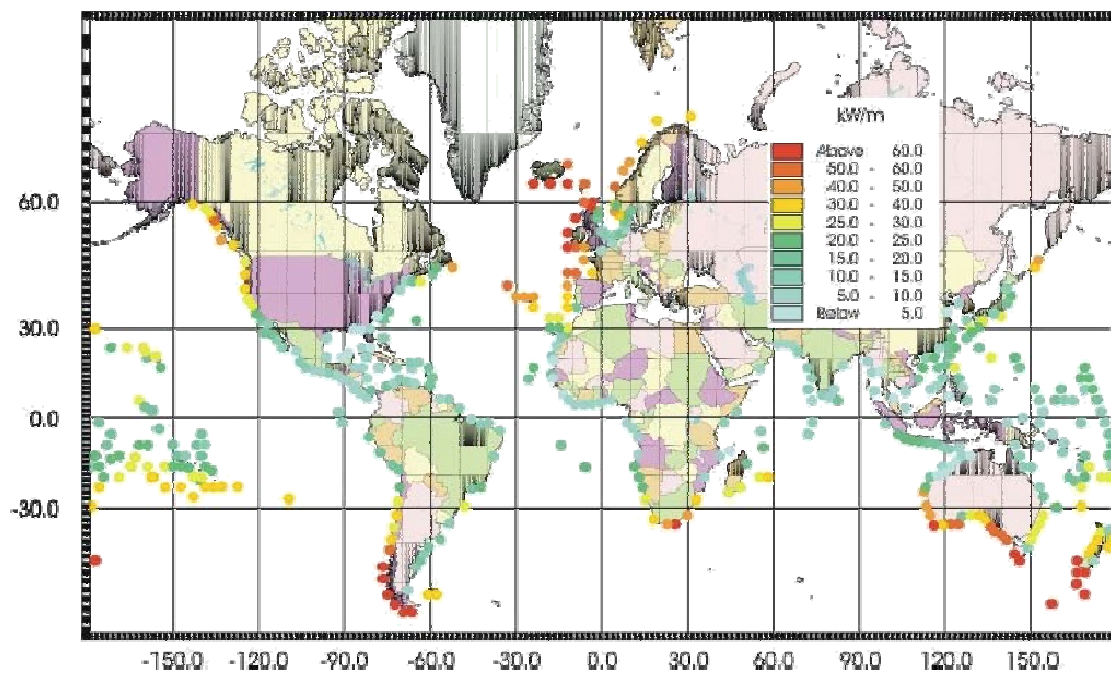
Figura IV.9 Representación lineal de diferentes conceptos energéticos, referida a las coordenadas de latitud. Fuente: Acuña, A. y Monández, P. (2007)

La misma información que en las figuras anteriores puede presentarse de manera más simplificada trabajando directamente sobre el mapa de localización.

Los mapas pueden ser más o menos sencillos (figuras IV.10 y IV.11) y también permiten establecer una comparativa o clasificación de los resultados mediante técnicas como la utilización de diferentes colores o intensidades de colores...



Figuras IV.10 Potencial medio anual de la energía del oleaje en la franja costera europea. Fuente: <http://geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/world/europe/ocean-europe/>



Figuras IV.11 Potencial medio anual de la energía del oleaje en todo el planeta. Fuente: http://www.oceanor.no/projects/wave_energy

Para la representación de tres variables o más, como es el caso de la distribución del potencial medio de energía en función de su dirección media y de su localización, lo más adecuado es la utilización de mapas con simbologías específicas.

Igualmente que en el caso anterior, la representación puede ser más o menos sencilla, en función del rigor de la información que se quiera mostrar (figuras IV.12, IV.13 y IV.14).

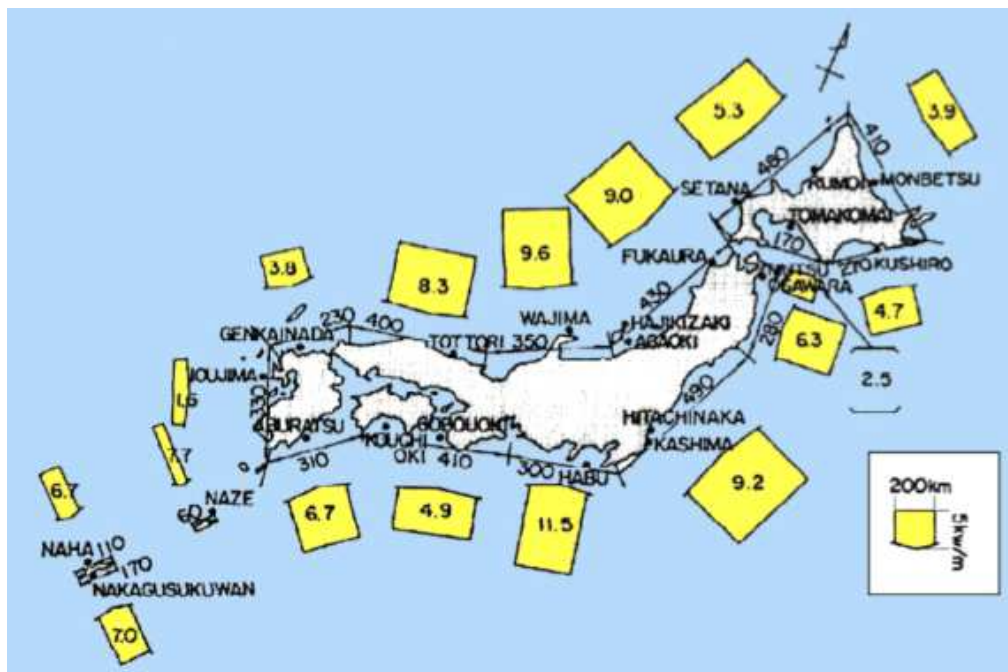


Figura IV.12 Potencial medio anual de la energía del oleaje alrededor de la franja costera de la Isla de Japón. Fuente: Hagerman, G. (2001)

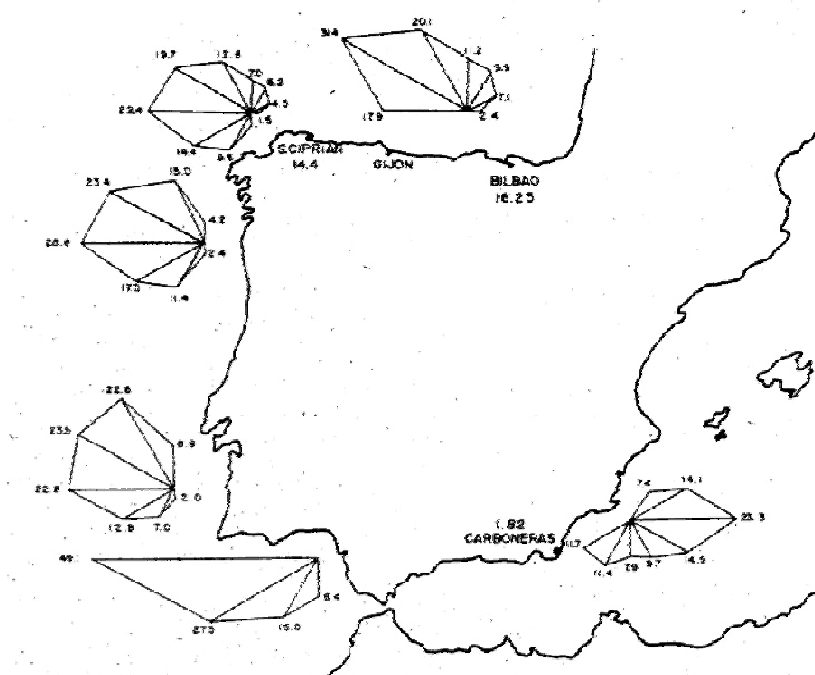


Figura IV.13 Potencial medio anual de la energía del oleaje en la franja costera de la península española. Fuente: Vidal, C. (1986b)

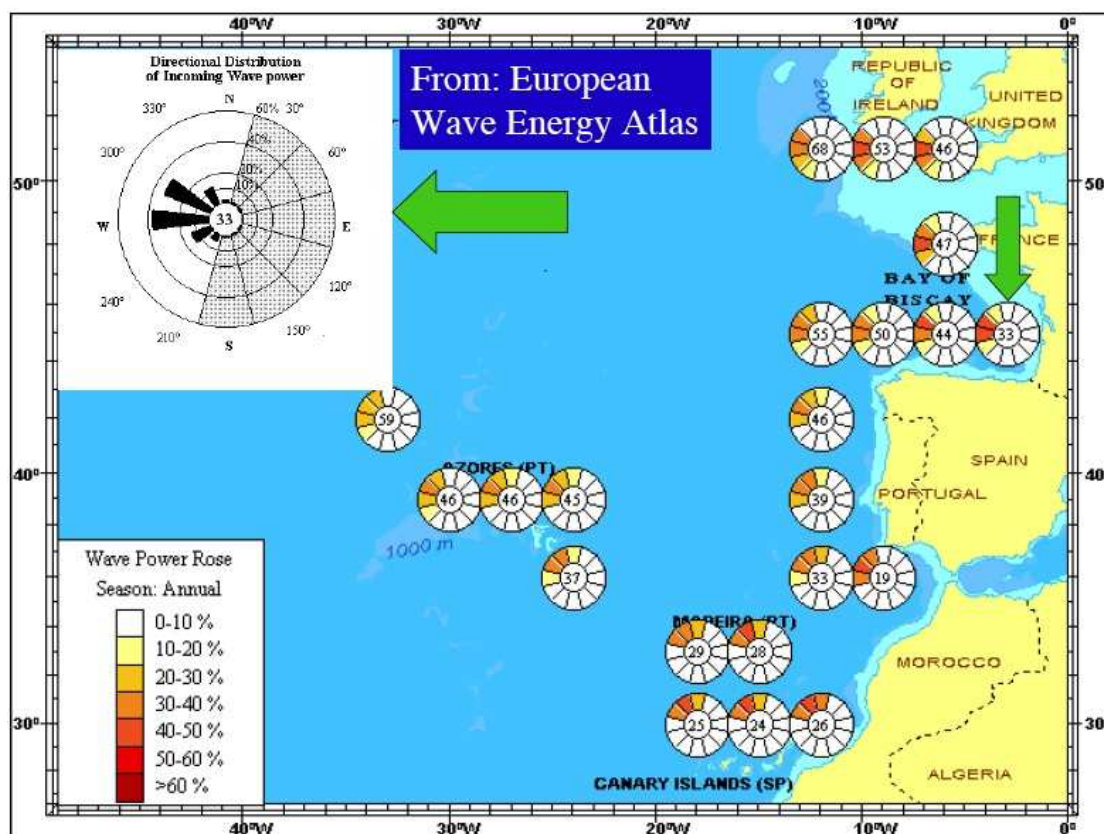


Figura IV.14 Potencial medio anual de energía del oleaje en la franja costera europea, bañada por el Océano Atlántico. Fuente: <http://ec.europa.eu/research/energy>

Hasta ahora se ha supuesto que se trabajaba con un número finito de puntos, de manera que los resultados se han presentado de manera discreta.

Sin embargo, cuando se dispone de información referente a todo el conjunto, se puede representar el potencial energético del oleaje como un fenómeno continuo (figura IV.16).

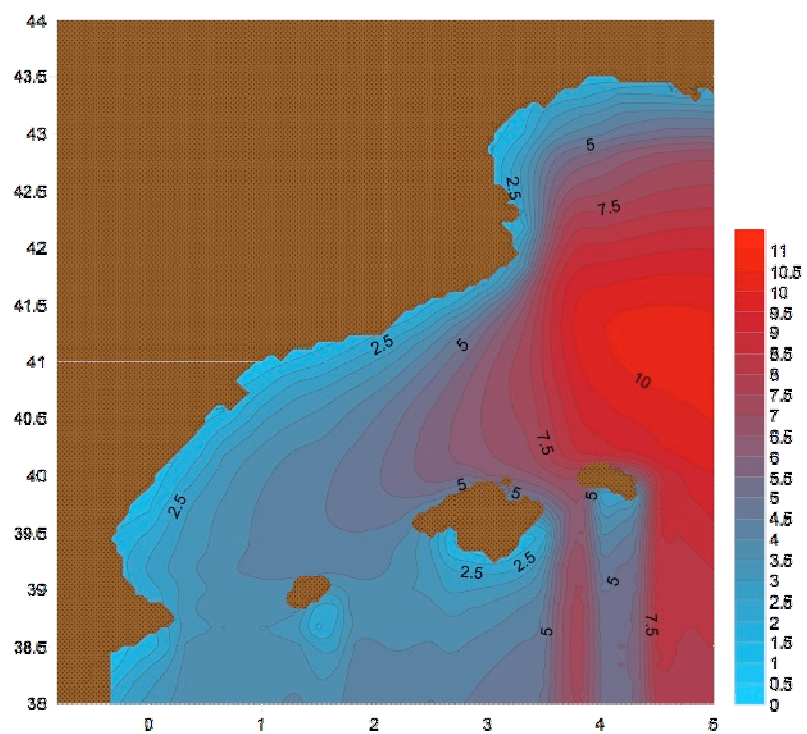


Figura IV.16 Potencial medio anual de la energía del oleaje del Mar Mediterráneo, calculado para el año 2005. *Fuente: Guix, M.R. (2006)*

Capítulo V

Aplicación a la Isla de Lanzarote

Finalmente, en este capítulo se realiza el análisis del potencial de la energía del oleaje de un caso real: la Isla de Lanzarote.

5.1 Antecedentes

Lanzarote es la más septentrional y oriental de las islas del archipiélago canario (España), en el Océano Atlántico, frente a las costas del sur de Marruecos.

Concretamente, Lanzarote se encuentra a 140 kilómetros de la costa noroccidental africana y a 1000 kilómetros del punto más cercano del continente europeo, en el sur de la Península Ibérica.



Figura V.1 Imagen de satélite de las Islas Canarias, destacando la Isla de Lanzarote. *Fuente: Imagen modificada del Google Earth*

La isla puede dividirse en tres zonas diferenciadas:

- Zona Norte: donde se encuentran las Playas de la Famara (oeste) y de la Orzola (este).
- Zona Centro: donde se encuentra la Playa de La Santa (este), la costa de Teguise y la Playa Honda (oeste); y donde se ubica la capital de la isla (Arrecife) y el Puerto del Carmen.
- Zona Sur: donde se encuentra la Playa Blanca.

Junto a la isla se encuentran la Zona de los Islotes e islas menores de Alegranza, La Graciosa, Montaña Clara, Roque del Este y Roque del Oeste, que forman el Archipiélago Chinijo, administrativamente dependiente de Lanzarote.

Según datos del INE (Enero de 2008), la isla de Lanzarote cuenta con una superficie de

845,93 km² y una población de 139.506 habitantes.

En la actualidad la economía de la isla gira en torno al sector servicios, fundamentalmente a la potente industria turística.

Uno de los principales atractivos de la Isla es el gran número de espacios naturales de que dispone, todos ellos protegidos, convirtiéndola en reserva de la biosfera y pionera de la sostenibilidad en el archipiélago canario.

Sin embargo, la controversia energética actual (el creciente consumo de energía y la dependencia de los combustibles fósiles), también empieza a ser una realidad en la isla de Lanzarote; lo cual podría poner en peligro ese futuro sostenible al que aspira.

Perdomo, A. (2008), asesor en energías renovables de la Consejería de Industria del Cabildo, señala en una de sus entrevistas, que la isla depende energéticamente en un 99,4% de los combustibles fósiles, y sólo el 0,6% restante pertenece a la producción de energías renovables.

Paralelamente, la isla de Lanzarote cuenta con grandes potenciales de diferentes fuentes naturales, entre las que se encuentra el oleaje, cuya potencialidad todavía se desconoce.

Es por ello que las autoridades de la isla apuestan por la generación de energías renovables, y concretamente la de aprovechar la energía del oleaje para la producción de electricidad.

Además, existen ciertas situaciones actuales que pueden verse beneficiadas por la elección del aprovechamiento de la energía oleaje en la isla de Lanzarote: el aprovechamiento del dispositivo captador de energía para la desalinización del agua y el suministro autónomo de electricidad a la isla.

Tal y como Perdomo, A. (2008) asegura al final de su entrevista:

«Lanzarote quiere constituirse en facilitadora y gestora de las instalaciones privadas»

5.2 Datos de oleaje utilizados

La recopilación de los datos del oleaje se centra en la zona del Océano Atlántico correspondiente a la costa de la Isla de Lanzarote.

De las diferentes fuentes disponibles, para el presente análisis se han elegido las bases de datos de retroanálisis de oleaje del Organismo Público de Puertos del Estado (OPPE): SIMAR-44 y WANA.

- El proyecto SIMAR-44 contiene los parámetros de estado de mar obtenidos de los registros direccionales durante un periodo de tiempo 44 años (1958 a 2001). Para la generación de los campos de oleaje utiliza un modelo numérico WAM. La resolución temporal es de 3 horas y la resolución espacial es de 0,25°.
- El proyecto WANA, consiste en una base de datos activa desde 1955, que utiliza el modelo de generación de oleaje WAN en una red próxima a las costas españolas. La resolución temporal varía entre 3-5 horas y la resolución espacial oscila entre 0,125°-0,25°.

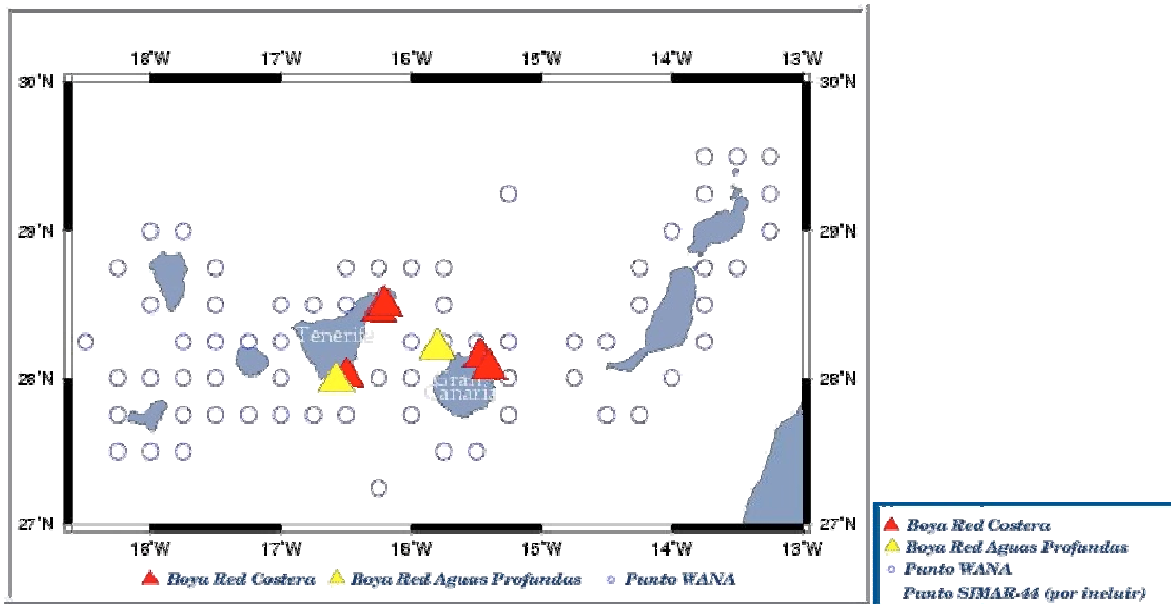


Figura V.2 Disposición de las boyas y los puntos de simulación existentes en las Islas Canarias. Fuente: www.puertos.es

Por tratarse de datos obtenidos a partir del retroanálisis del oleaje, podrían requerir de calibración a partir de los datos que proporcionan las fuentes instrumentales.

Sin embargo, tal y como se verá a continuación, la información facilitada corresponde a valores promediados en series de tiempo de larga duración. Por lo que en este caso, y tal y como indicaba Guix, M.R. (2006) en su tesina de especialidad, los modelos numéricos se pueden considerar bastante fiables.

La información referente al oleaje se ha generado para una malla formada por nueve puntos que rodean la Isla de Lanzarote.

En la figura V.3 se detalla el espaciamiento de la malla considerada, indicándose la nomenclatura de cada uno de los puntos de simulación (puntos base), así como sus coordenadas.

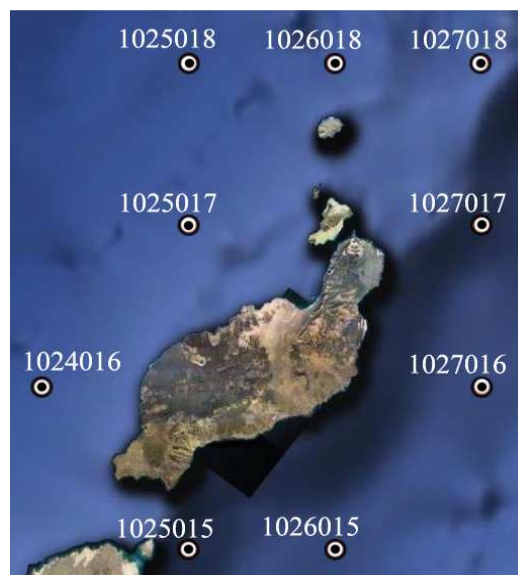


Figura V.3 Mapa donde se localizan los puntos base, junto con sus coordenadas. Fuente: Imagen modificada del Google Earth

Tabla V.1 Puntos de la malla considerada (Isla de Lanzarote).
Fuente: LIM, UPC (2008)

NOMENCLATURA	COORDENADAS	
	Latitud	Longitud
1024016	29.000° N	14.000° W
1025015	28.750° N	13.750° W
1025017	29.250° N	13.750° W
1025018	29.500° N	13.750° W
1026015	28.750° N	13.500° W
1026018	29.500° N	13.500° W
1027016	29.000° N	13.250° W
1027017	29.250° N	13.250° W
1027018	29.500° N	13.250° W

La serie temporal de los datos cubre el período 1958-2008, que queda repartido de la siguiente manera:

- Datos mensuales promediados para una serie de 37 años (1958-1995) pertenecientes a la base de datos SIMAR-44, para cada uno de los puntos base.
- Datos mensuales promediados para una serie de 13 años (1996-2008) pertenecientes a la base de datos WANA, para cada uno de los puntos base.

Para cada mes, promedio de todos los meses de una serie de 50 años en total, se han facilitado las series temporales de los parámetros espectrales $(H_{m0})_i$ - $(T_P)_i$ y la dirección media del potencial de energía $(\theta_m)_i$. Además, en este caso, se han facilitado también medidas cuantitativas del potencial de la energía del oleaje, para diferentes definiciones.

Todos estos datos han sido cedidos por el LIM (Laboratorio de Ingeniería Marítima) de la Universidad Politécnica de Cataluña, que los ha presentado ordenados en tablas, según la plantilla tipo de la figura V.4, lo cual ha facilitado la consulta y manipulación de la información necesaria.

Teniendo en cuenta que el registro de datos se compone de 50 años sucesivos y que cada uno de ellos por 12 meses, se ha trabajado con un total de 600 plantillas.

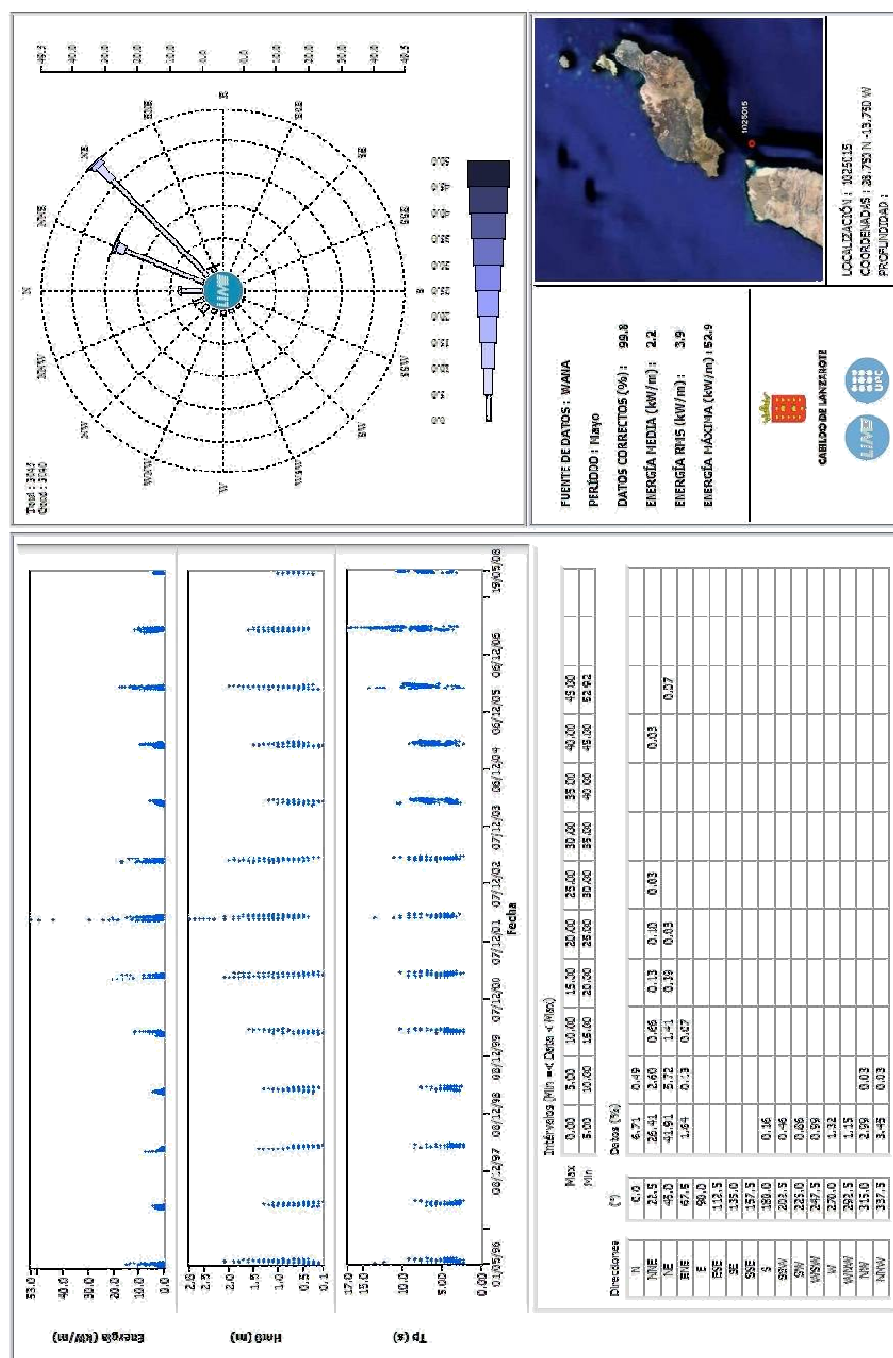


Figura V.4 Ejemplo de plantilla tipo donde se muestran los datos el oleaje necesarios para la evaluación del potencial energético en la Isla de Lanzarote. *Fuente: LIM, UPC (2008)*

Se indica también cómo han sido obtenidas las medidas cuantitativas referentes al potencial de la energía del oleaje, por parte del LIM; a pesar de que no ha sido objeto de este trabajo.

Para el cálculo del potencial de energía P_i a partir de cada par $(H_{m0})_i - (T_P)_i$, se ha considerado el modelo espectral tipo JONSWAP con $\beta=0.5$, es decir:

$$P_i = 0.5 \cdot ((H_{m0})_i)^2 T_{P_i} [kW / m]$$

Para la definición del potencial mensual de energía, representativo de la Isla, a partir del conjunto de valores P_i obtenidos; se ha recurrido a las siguientes medidas de posición

centrales:

- Media aritmética: $\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n}$

- Media cuadrática: $P_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i)^2}{n}} = \sqrt{\frac{(P_1)^2 + (P_2)^2 + \dots + (P_n)^2}{n}}$

El objetivo es poder estimar de manera más aproximada el valor en torno al cual se agrupan, en mayor medida, los valores calculados para el potencial de energía mensual de un año promedio.

Por otro lado, para cada muestra mensual de valores P_i , se ha almacenado también el valor del potencial máximo de energía que alcanza el oleaje durante cada mes de un año promedio. Es decir:

- Máximo: $P_{\max} = \text{MÁX}(P_1, P_2, \dots, P_n)$

5.3 Tratamiento de los datos

Para la obtención de los resultados a partir de las 600 plantillas de datos facilitadas, se ha procedido de la siguiente manera:

Previamente se ha tenido en cuenta la recomendación a modo de dos pasos, que hace Vidal, C. (1986b), para el estudio de las disponibilidades energéticas del oleaje.

Para el análisis del potencial de la energía del oleaje, primeramente se han confeccionando tres tablas, con los datos correspondientes a cada una de las tres definiciones del potencial mensual de energía, representativo de la Isla (figura V.5). En cada una de las tres tablas, se han ordenado los valores para cada mes promedio (filas) y para cada punto base (columnas), tal y como se muestra en la tablas V.2, V.4 y V.6.

Esta forma de presentar los datos, ha facilitado su posterior gestión operativa y gráfica. Se han obtenido los valores promedios de interés y se ha visualizado la variabilidad espacial y temporal, a unas escalas concretas.

Para el tratamiento estacional de los datos, y concretamente para la definición de las estaciones; se ha recurrido a la distinción que utiliza en sus estudios la Red de Puertos del Estado:

- Primavera: meses de marzo, abril y mayo.
- Verano: meses de junio, julio y agosto.
- Otoño: meses de septiembre, octubre y noviembre.
- Invierno: meses de diciembre, enero y febrero.

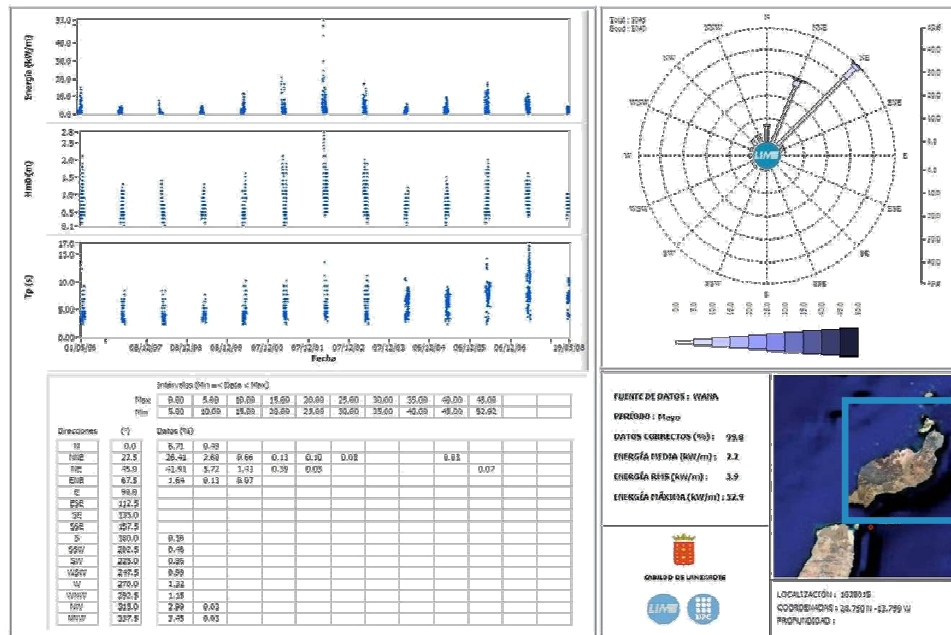


Figura V.5 Plantilla donde se indican de los datos utilizados para el análisis del potencial de la energía del oleaje. Fuente: LIM, UPC (2008)



Para el conocimiento de cómo queda repartido el potencial de energía del oleaje en cada una de las direcciones, se han utilizado las series de datos direccionales cedidos por el LIM, correspondientes a la distribución del potencial medio de energía para cada mes de un año promedio, y en cada uno de los puntos objetivo.

La gestión de los datos ha sido más tediosa que en el caso anterior, debido a que las medidas facilitadas al respecto, no eran directas. Para cada mes promedio, se ha dispuesto de una tabla como la de la figura V.6, donde se indica el repartimiento, en porcentaje y en cada uno de los intervalos energéticos indicados; del potencial de la energía del oleaje, para cada una de las diferentes direcciones.

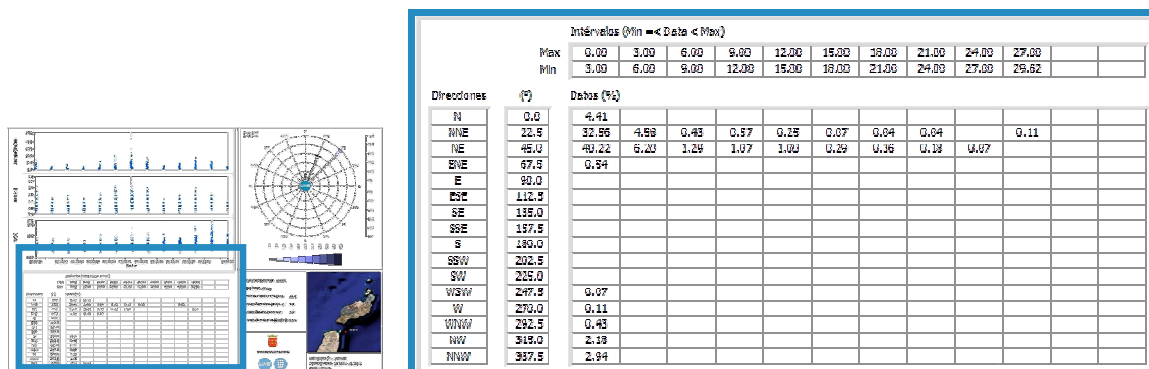


Figura V.6 Plantilla donde se indican los datos utilizados para el estudio por direcciones del potencial medio de la energía del oleaje. Fuente: LIM, UPC (2008)

Por lo tanto, primeramente se ha tenido que calcular, para cada una de las plantillas, el potencial medio mensual total, disponible en cada dirección. Éste se ha obtenido mediante una transformación de unidades (de tanto por ciento a kW/m): se ha multiplicado el valor medio de cada intervalo energético por su correspondiente porcentaje y a continuación, se han sumado todos los miembros transformados de una misma fila (figura V.7).

Estudio por direcciones del potencial medio de la energía del oleaje.xls:2															
R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
Febrero		35,5	106,5	177,5	248,5	319,5	390,5	461,5	532,5	603,5	673,79	Potencial Total Medio			
P-1019017	N	11,51	2,89	0,69	0,32	0,08						=(T28*\$T\$27+U28*\$U\$27+V28*\$V\$27+W28*\$W\$27+X28*\$X\$27+Y28*\$Y\$27+Z28*\$Z\$27+AA28*\$AA\$27+AB28*\$AB\$27+AC28*\$AC\$27)/100			
	NNE	11,14	1,39	0,25	0,09										
	NE	1,73	0,27	0,11											
	ENE	0,5	0,01												
	E	0,35	0,02												
	ESE	0,05	0,01												
	SE	0,01													
	SSE	0,01													
	S														
	SSW														
	SW	0,1	0,02												
	WSW	0,35	0,12		0,03	0,02	0,01	0,02							
	W	1,46	0,28	0,09											
	WNW	9,06	2,13	0,54	0,1	0,05	0,03	0,04							
	NW	20,51	4,12	0,78	0,4	0,21	0,16	0,04	0,05	0,02	0,04				
	NNW	18,14	3,67	1,17	0,44	0,13									

Figura V.7 Detalle de las tablas de trabajo confeccionadas, para el estudio por direcciones del potencial medio de la energía del oleaje.

Los valores obtenidos se han ordenado en nueve tablas (una para cada punto base), de la forma que se indica en la figura V.8. A partir de ellas se han calculado los promedios anuales y estacionales, mediante los cuales se han confeccionado las tablas: de la V.8 a la V.12.

promedio: SIMAR y WANA (1958-2008)																	
P-1024016	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	ANUAL	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
N	7,643	10,144	9,179	12,050	7,829	6,042	6,315	5,836	6,855	6,771	11,696	6,556	8,297	9,720	6,098	8,454	8,914
NNE	1,844	1,531	0,980	1,805	1,294	1,199	3,766	2,836	1,194	1,017	1,396	1,593	1,730	1,353	2,644	1,269	1,656
NE	0,080	0,054	0,001	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,013	0,029	0,019	0,004	0,003	0,015	0,064
ENE	0,025	0,031	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,016	0,009	0,001	0,000	0,010	0,025
E	0,042	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,009
ESE	0,023	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000	0,013
SE	0,013	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,006	0,003	0,000	0,000	0,001	0,009
SSE	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,019	0,002	0,000	0,000	0,000	0,007
S	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,012	0,001	0,000	0,000	0,000	0,004
SSW	0,001	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,004	0,026	0,003	0,000	0,000	0,002	0,011
SW	0,192	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,019	0,029	0,046	0,020	0,000	0,000	0,015	0,064
WSW	0,286	0,198	0,022	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029	0,194	0,286	0,071	0,012	0,000	0,000	0,043	0,231
W	0,661	0,664	0,305	0,255	0,005	0,011	0,000	0,000	0,002	0,151	0,651	0,636	0,360	0,188	0,004	0,268	0,741
WNW	4,307	4,647	3,754	1,237	0,320	0,037	0,000	0,000	0,104	0,867	1,345	5,398	1,860	1,771	0,012	0,805	4,851
NW	21,136	16,326	11,337	7,761	2,786	0,591	0,011	0,060	1,402	5,672	10,463	19,060	8,217	7,295	0,217	5,846	19,508
NNW	20,129	16,577	10,610	13,423	5,502	2,593	0,706	1,482	7,855	12,646	13,326	13,641	9,973	9,912	1,721	11,342	16,916
P-1025015	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	ANUAL	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
N	0,489	0,592	0,507	0,337	0,277	0,113	0,047	0,047	0,165	0,294	0,292	0,387	0,305	0,374	0,136	0,250	0,490
NNE	0,893	0,771	0,324	0,635	0,655	1,282	0,605	0,471	0,501	0,544	0,580	0,584	0,747	0,878	0,795	0,541	0,783
NE	2,068	1,533	2,469	2,344	1,656	2,713	2,512	2,208	1,433	1,633	1,762	1,679	2,071	2,230	2,478	1,616	1,959
ENE	0,503	0,293	0,173	0,081	0,032	0,007	0,013	0,011	0,030	0,125	0,246	0,469	0,166	0,089	0,010	0,134	0,432
E	0,362	0,153	0,055	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,017	0,091	0,155	0,070	0,021	0,000	0,037	0,223
ESE	0,142	0,092	0,022	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,013	0,116	0,035	0,008	0,000	0,016	0,116
SE	0,057	0,024	0,012	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,020	0,056	0,014	0,004	0,000	0,008	0,046
SSE	0,046	0,007	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,014	0,062	0,012	0,004	0,000	0,005	0,039
S	0,042	0,017	0,013	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,015	0,081	0,015	0,006	0,000	0,007	0,040
SSW	0,074	0,035	0,043	0,016	0,008	0,000	0,000	0,000	0,002	0,041	0,036	0,129	0,032	0,021	0,000	0,027	0,079
SW	0,195	0,046	0,030	0,021	0,011	0,003	0,000	0,000	0,001	0,025	0,032	0,085	0,031	0,021	0,001	0,020	0,082
WSW	0,080	0,031	0,032	0,019	0,013	0,002	0,000	0,000	0,000	0,020	0,055	0,082	0,028	0,021	0,001	0,025	0,064
W	0,169	0,052	0,052	0,023	0,019	0,002	0,000	0,000	0,002	0,037	0,071	0,088	0,039	0,031	0,001	0,036	0,087
WNW	0,225	0,391	0,238	0,106	0,031	0,014	0,000	0,000	0,003	0,033	0,125	0,271	0,121	0,125	0,005	0,060	0,295
NW	0,758	0,676	0,605	0,453	0,171	0,171	0,004	0,008	0,080	0,305	0,458	0,767	0,369	0,413	0,061	0,274	0,807
NNW	0,400	0,474	0,441	0,350	0,182	0,237	0,024	0,022	0,059	0,274	0,331	0,435	0,272	0,324	0,094	0,235	0,436
P-1026017	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	ANUAL	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
N	5,404	10,854	12,006	12,427	8,149	5,655	5,680	5,691	7,249	7,829	12,135	9,405	8,841	10,861	5,879	9,071	9,554
NNE	2,211	2,193	2,221	2,032	1,7597	2,113	6,335	3,658	1,779	1,665	2,166	2,193	12,177	40,918	3,769	1,863	2,170
NE	0,122	0,182	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,011	0,002	0,002	0,080	0,033	0,043	0,012	0,014	0,028	0,119
ENE	0,030	0,044	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,050	0,009	0,000	0,000	0,000	0,029
E	1,395	0,998	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ESE	0,009	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,005
SE	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,003

Figura V.8 Detalle de las tablas de trabajo confeccionadas, para el estudio por direcciones del potencial medio de la energía del oleaje.

5.4 Resultados

Finalmente, con base en la metodología descrita en el apartado de la gestión de resultados del capítulo IV, se han confeccionado una serie de gráficos referentes a la variabilidad temporal y espacial del potencial de la energía del oleaje de un año promedio y en el área de estudio que comprende a la Isla de Lanzarote.

Los resultados se presentan en forma anual, mensual y estacional.

En primera instancia, se consideran los puntos de simulación de la malla (puntos base) como los puntos objetivo.

5.4.1 Análisis del potencial de la energía del oleaje

Para el *primer estadístico*, correspondiente a la media muestral del flujo de energía mensual, se ha estimado el potencial medio de energía del oleaje de la Isla de Lanzarote, en 23,47 kW/m.

Tabla V.2 Potencial medio mensual de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote. [kW/m]

Mes	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
Enero	51.65	5.45	53.30	57.05	7.90	57.20	28.35	41.60	57.60
Febrero	48.25	5.45	49.75	53.35	8.10	53.40	27.00	39.40	53.70
Marzo	43.55	5.25	45.10	48.10	8.25	48.15	25.40	35.95	48.45
Abril	29.80	4.00	30.95	33.00	6.85	33.20	20.30	26.35	33.50
Mayo	17.90	2.85	18.75	20.35	5.25	20.55	14.10	17.45	20.90
Junio	11.00	2.20	11.70	12.90	4.15	13.10	9.90	11.55	13.30
Julio	10.85	3.10	11.65	13.15	6.00	13.40	11.85	12.80	13.75
Agosto	10.55	2.50	11.15	12.25	4.95	12.45	10.45	11.60	12.70
Septiembre	14.45	2.05	15.10	16.25	3.60	16.40	11.05	13.85	16.60
Octubre	27.05	2.70	27.95	29.80	4.15	29.85	17.35	23.40	29.95
Noviembre	36.85	3.70	38.05	40.80	6.10	40.70	23.55	31.50	40.70
Diciembre	48.45	4.90	49.80	53.05	7.35	52.90	26.20	38.00	53.15

Éste queda repartido a lo largo de un año promedio y en cada uno de los puntos objetivo, según la tabla V.2.

Se ha representado gráficamente la evolución del potencial medio de energía a lo largo de un año promedio, según la figura V.9.

Se observa que el potencial energético del oleaje es un fenómeno que presenta una gran variabilidad a lo largo del año, existiendo un umbral máximo y mínimo, pero sin disponer de ningún mes en que el oleaje carezca de energía.

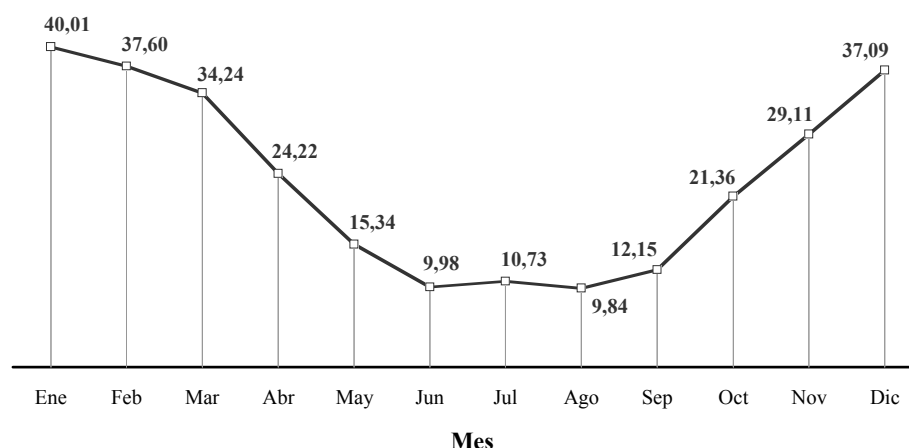


Figura V.9 Evolución mensual del potencial medio de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Los meses invernales son los que disponen de un mayor potencial energético y viceversa, siendo la máxima diferencia entre meses de aproximadamente 30 kW/m.

Queda demostrado que a pesar de que la energía del oleaje está disponible durante todo el año, el comportamiento de su potencial energético viene condicionado por las condiciones climáticas y por lo tanto, dominado por la fase invernal.

Esta misma evolución temporal se puede observar en cada uno de los puntos objetivo (tabla V.2), siendo el dominio de la zona de Los Islotes la que cuenta con un mayor potencial energético a lo largo de todo el año. El caso contrario corresponde a la Zona Centro Oeste de la Isla, donde se ubica el Puerto del Carmen, y a la Playa Blanca.

Se ha evaluado también, para cada uno de los puntos objetivo, el potencial medio de energía estacional, que se presenta en la tabla V.3.

Tabla V.3 Potencial medio estacional de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote. [kW/m]

Estación	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
Primavera	30,42	4,03	31,60	33,82	6,78	33,97	19,93	26,58	34,28
Verano	10,80	2,60	11,50	12,77	5,03	12,98	10,73	11,98	13,25
Otoño	26,12	2,82	27,03	28,95	4,62	28,98	17,32	22,92	29,08
Invierno	49,45	5,27	50,95	54,48	7,78	54,50	27,18	39,67	54,82

Haciendo la media de los promedios estacionales de todos los puntos objetivo, se obtiene la variabilidad estacional del potencial medio de energía del oleaje para un año promedio y en el área de estudio:

- Potencial medio de energía en primavera de 24.60 kW/m.
- Potencial medio de energía en verano de 10.18 kW/m.
- Potencial medio de energía en otoño de 20.87 kW/m.
- Potencial medio de energía en invierno de 38.23 kW/m.

De nuevo se evidencia que el mayor potencial energético del oleaje se manifiesta en los meses invernales, seguidos de los meses de transición (correspondientes a las estaciones de la primavera y el otoño), en los que la energía del oleaje presenta un potencial similar. En verano este potencial decae en más de la mitad de la energía que

puede llegar a concentrarse en invierno.

En cuanto a la variabilidad espacial, en la figura V.10 se observa que el potencial energético aumenta ligeramente en sentido horario alrededor de la franja costera oeste de la isla y disminuye considerablemente en sentido también horario alrededor de la franja costera este de la isla.

De nuevo se evidencia que las localizaciones que cuentan con un mayor potencial son las situadas en el sector norte de la isla, aventajando al sector sur-este en más de 20 kW/m, como media.

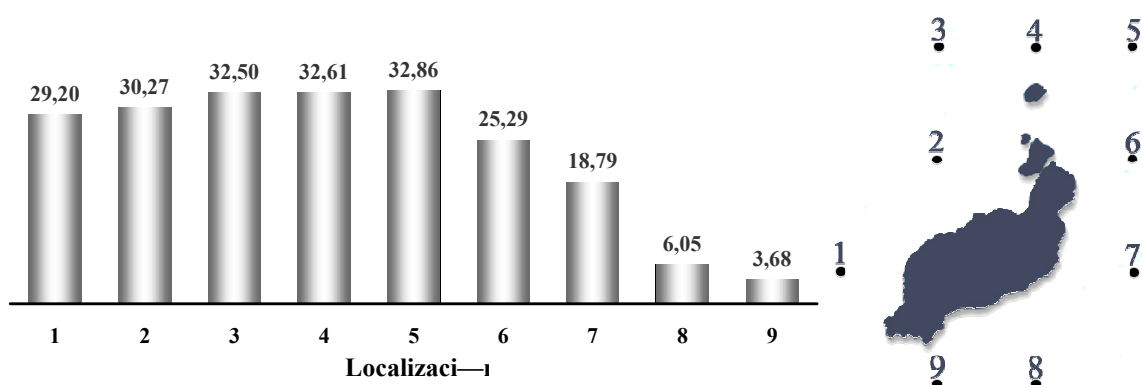


Figura V.10 Reparto del potencial medio anual de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Se ha evaluado también el potencial energético del oleaje en la Isla de Lanzarote, para el *segundo estadístico*, correspondiente a la media cuadrática, siguiendo el mismo esquema que en el caso anterior.

Se ha estimado el potencial medio de energía de la Isla de Lanzarote en 33,44 kW/m.

El repartimiento de éste a lo largo de un año promedio y en cada uno de los puntos objetivo, se ha presentado en la tabla V.4.

Tabla V.4 Potencial medio mensual de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote. [kW/m]

Mes	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
Enero	72.35	8.30	74.80	79.15	12.45	79.65	42.15	59.30	80.40
Febrero	71.80	8.00	73.80	77.95	11.95	78.25	40.00	57.05	78.65
Marzo	59.05	7.85	61.20	64.80	12.45	65.00	36.90	49.60	65.40
Abril	44.80	5.90	46.55	49.25	10.15	49.45	28.65	37.10	49.85
Mayo	23.85	4.50	25.05	27.20	8.00	27.65	19.80	23.85	28.35
Junio	13.80	3.60	14.75	16.50	6.40	16.90	13.60	15.40	17.35
Julio	13.25	4.60	14.30	16.45	8.35	16.80	15.35	16.35	17.35
Agosto	12.90	3.60	13.65	15.05	6.75	15.30	13.10	14.50	15.70
Septiembre	20.95	3.05	21.95	23.50	5.10	23.80	16.20	20.20	24.20
Octubre	40.25	4.25	41.65	43.95	6.90	44.10	26.00	34.40	44.40
Noviembre	55.40	5.75	57.00	60.25	9.60	60.30	35.50	46.60	60.45
Diciembre	70.85	7.80	72.80	76.45	12.00	76.20	38.85	54.60	76.60

En cuanto a la variabilidad temporal (a diferentes escalas de tiempo, de un año promedio) obviamente se espera un comportamiento del flujo medio de energía, similar al del caso anterior.

En este caso, la máxima diferencia entre meses es superior a 40 kW/m (figura V.11). Sin embargo no hay que extrapolar esta observación a cada uno los puntos objetivo, ya que en la tabla V.3 puede observarse que no todas las localizaciones disponen de potenciales que alcancen estas magnitudes. Por ejemplo, los puntos ubicados en el sector sur de la malla, independientemente de la fase estacional, cuentan con un oleaje cuyo potencial energético varía en el intervalo 5-10 kW/m.

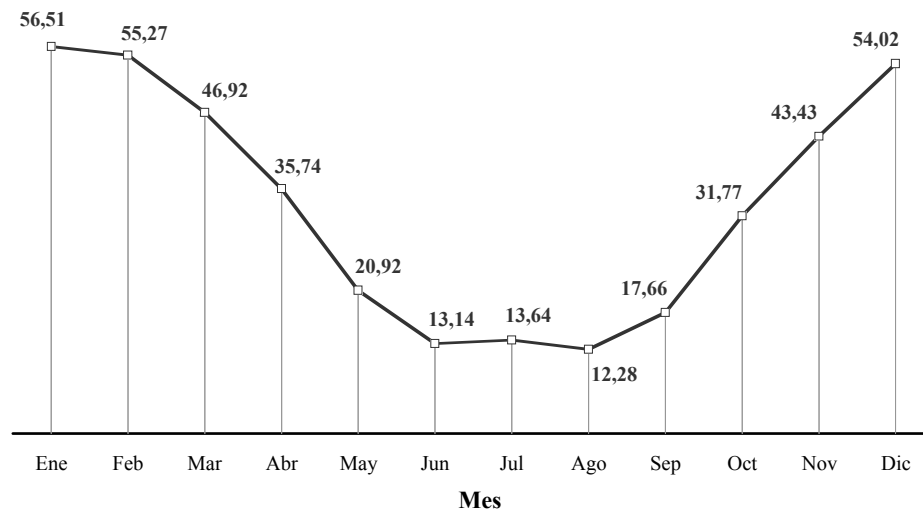


Figura V.11 Evolución mensual del potencial medio de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Los valores promedios estacionales, para cada uno de los puntos objetivo y los promedios totales referentes a la Isla de Lanzarote, se presentan a continuación:

Tabla V.5 Potencial medio estacional de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote. [kW/m]

Estación	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
Primavera	42,57	6,08	44,27	47,08	10,20	47,37	28,45	36,85	47,87
Verano	13,32	3,93	14,23	16,00	7,17	16,33	14,02	15,42	16,80
Otoño	38,87	4,35	40,20	42,57	7,20	42,73	25,90	33,73	43,02
Invierno	71,67	8,03	73,80	77,85	12,13	78,03	40,33	56,98	78,55

- Potencial medio de energía en primavera de 34.53 kW/m.
- Potencial medio de energía en verano de 13.02 kW/m.
- Potencial medio de energía en otoño de 30.95 kW/m.
- Potencial medio de energía en invierno de 55.26 kW/m.

El comportamiento de la variabilidad espacial también es similar al del caso anterior, con la diferencia de que las medidas cuantitativas obtenidas también son superiores (figura V.12).

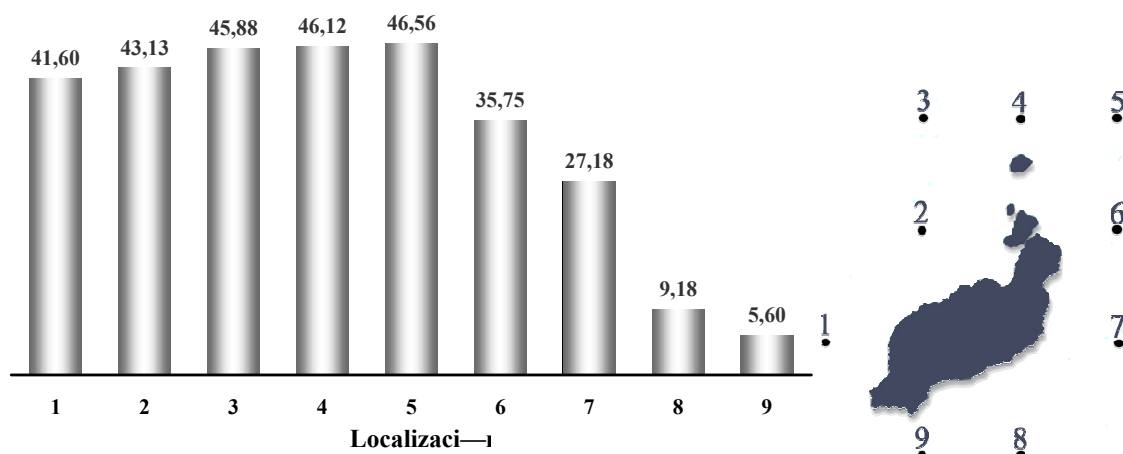


Figura V.12 Reparo del potencial medio anual de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Finalmente, se presenta la evaluación del potencial de energía del oleaje para el tercer estadístico, correspondiente al máximo del potencial de energía mensual.

Se ha estimado el potencial medio máximo del oleaje de la Isla de Lanzarote en 251,18 kW/m.

Éste queda repartido a lo largo de un año promedio y en cada uno de los puntos objetivo, según la tabla V.6.

Tabla V.6 Potenciales máximos mensuales de la energía del oleaje, entorno a la Isla de Lanzarote. [kW/m]

Mes	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
Enero	549.15	69.75	580.00	603.00	114.65	611.75	340.50	504.65	626.45
Febrero	575.90	50.85	598.25	613.10	85.05	606.20	261.80	370.20	598.25
Marzo	396.05	55.50	403.45	415.90	89.15	415.90	252.30	285.10	415.90
Abril	528.95	52.95	547.60	569.65	93.00	561.25	193.70	303.30	561.25
Mayo	141.55	41.60	146.65	156.15	63.00	163.65	117.95	137.05	171.55
Junio	78.70	30.60	85.45	103.05	52.05	105.30	90.65	98.80	108.00
Julio	67.65	29.90	70.80	85.10	50.30	87.85	86.55	90.15	91.55
Agosto	74.80	31.20	65.60	80.80	50.95	84.80	77.65	86.20	93.85
Septiembre	209.30	22.30	216.60	229.05	36.70	229.05	163.35	196.10	232.90
Octubre	350.65	45.50	360.90	365.25	71.15	365.25	198.95	248.55	365.25
Noviembre	420.90	43.50	441.60	466.70	84.10	473.70	315.95	390.80	480.20
Diciembre	446.55	78.20	460.25	473.25	132.65	280.55	278.70	374.40	480.35

A grandes rasgos, el comportamiento de la variabilidad temporal también es similar a los casos anteriores, a pesar de que el potencial presenta un punto de inflexión durante su descenso, en la fase primaveral (figura V.13).

No obstante, los incrementos son más acusados, ya que los resultados obtenidos hacen referencia al valor máximo que alcanza el potencial energético del oleaje en cada uno de los meses de un año promedio. Los órdenes de magnitud asolidos remarcen la gran variabilidad que presenta el potencial energético del oleaje a escalas de tiempo superiores a la diaria.

De nuevo los umbrales máximo y mínimo corresponden al mes de enero y al mes de

agosto, siendo la diferencia entre ellos aproximadamente de 350 kW/m.

De los órdenes de magnitud obtenidos en los resultados, se deduce que en el área de estudio que comprende a la Isla de Lanzarote (independientemente de la localización de los puntos objetivo), pueden darse condiciones del oleaje del orden de diez veces más potenciales que la tendencia media.

Sin embargo, estas condiciones son puntuales e imprevisibles, y por lo tanto no son representativas del comportamiento natural del oleaje en la zona a lo largo del año. Y es por ello también que estos resultados tampoco pueden ser objeto de estudio para el aprovechamiento de la energía del oleaje.

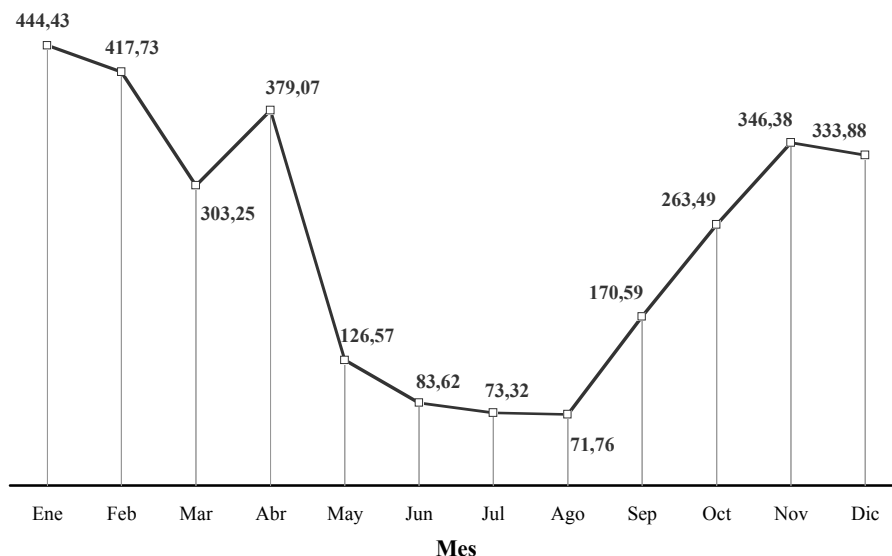


Figura V.13 Evolución mensual del potencial máximo promedio de la energía del oleaje, entorno a la Isla de Lanzarote.

Los valores del potencial medio máximo de energía estacional para cada uno de los puntos objetivo y los promedios totales referentes a la Isla de Lanzarote, se presentan a continuación:

Tabla V.7 Potencial máximo promedio estacional de la energía del oleaje, de un año promedio, en la Isla de Lanzarote. [kW/m]

Estación	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
Primavera	355,52	50,02	365,90	380,57	81,72	380,27	187,98	241,82	382,90
Verano	73,72	30,57	73,95	89,65	51,10	92,65	84,95	91,72	97,80
Otoño	326,95	37,10	339,70	353,67	63,98	356,00	226,08	278,48	359,45
Invierno	523,87	66,27	546,17	563,12	110,78	499,50	293,67	416,42	568,35

- Potencial máximo promedio de energía en primavera de 269.63 kW/m.
- Potencial máximo promedio de energía en verano de 76.23 kW/m.
- Potencial máximo promedio de energía en otoño de 260.16 kW/m.
- Potencial máximo promedio de energía en invierno de 398.0 kW/m.

En cuanto a la variabilidad espacial, se observa prácticamente el mismo comportamiento que en los casos anteriores, aunque al igual que en la variabilidad temporal, la diferencia

existente entre las medidas de los máximos potenciales a los que pueden verse sometidos los diferentes sectores es muy considerable (figura V.14).

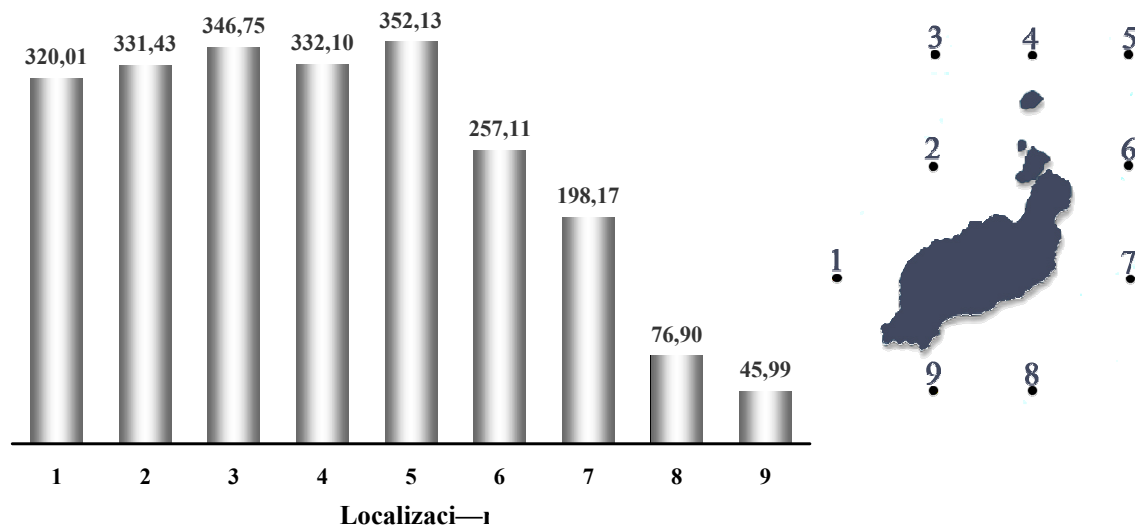


Figura V.14 Repartimiento del potencial máximo promedio de la energía del oleaje, entorno a la Isla de Lanzarote.

De nuevo el sector norte aparece como la zona óptima para el aprovechamiento de la energía, pudiendo estar expuesto a temporales máximos de más de 300 kW/m.

Estas cifras podrían resultar muy atractivas de cara al rendimiento de la conversión energética, ya que es muy fácil pensar que a mayores potenciales energéticos, la cantidad de energía captada (y por lo tanto, de electricidad producida) será mucho mayor.

Sin embargo en la realidad no es así: oleajes con grandes potenciales energéticos se traducen en un medio hostil, nada propicio para el correcto funcionamiento del dispositivo captador.

Por lo tanto, de nuevo añadir que estas medidas obtenidas no pueden ser orientativas del potencial medio que se puede esperar en la zona considerada como óptima, sino que deben ser un referente a la hora de diseñar la estructura, ya que permiten tener un conocimiento de los temporales máximos a los que puede verse sometida y el objetivo debería ser poder superar esta dificultad.

5.4.2 Estudio por direcciones del potencial de la energía del oleaje

Los resultados referentes a la distribución del potencial medio de energía en cada una de las direcciones, también se han gestionado gráficamente.

Se ha evaluado la variabilidad temporal, a escala estacional y anual, en cada uno de los nueve puntos objetivo.

Para ello, se ha escogido la metodología que se muestra en la figura IV.14 por considerarse la más adecuada para visualizar éste tipo de fenómeno. Ésta consiste en la representación del potencial mediante unos símbolos conocidos como rosas de energía.

Cada rosa se ubica en un punto objetivo (dando información de la localización de estudio) e indica los siguientes valores referentes al potencial de la energía del oleaje: la intensidad alcanzada en cada una de las direcciones (ésta se diferencia mediante diferentes tonalidades y se valora a partir de una serie de rangos energéticos

porcentuales, fijados) y el potencial medio anual o estacional (indicado numéricamente en el centro de la rosa).

A continuación se presentan las tablas con los resultados obtenidos y posteriormente, los cinco mapas confeccionados a partir de éstas.

Tabla V.8 Repartimiento del potencial medio de energía estacional – ANUAL – para un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Dirección	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
N	8.297	0.305	8.841	9.195	0.507	9.939	8.460	9.809	9.688
NNE	1.730	0.747	12.177	4.511	2.345	4.475	6.236	4.776	4.239
NE	0.019	2.071	0.043	0.245	2.551	0.197	0.220	0.162	0.144
ENE	0.009	0.166	0.009	0.040	0.113	0.046	0.101	0.061	0.046
E	0.003	0.070	0.118	0.040	0.068	0.051	0.083	0.058	0.056
ESE	0.003	0.035	0.001	0.019	0.037	0.036	0.494	0.049	0.051
SE	0.003	0.014	0.001	0.012	0.016	0.016	0.037	0.024	0.031
SSE	0.002	0.012	0.003	0.004	0.011	0.008	0.030	0.011	0.014
S	0.001	0.015	0.000	0.005	0.013	0.009	0.027	0.009	0.015
SSW	0.003	0.032	0.002	0.010	0.043	0.006	0.049	0.024	0.013
SW	0.020	0.031	0.013	0.028	0.075	0.017	0.092	0.039	0.047
WSW	0.071	0.028	0.068	0.117	0.081	0.085	0.103	0.067	0.115
W	0.300	0.039	0.316	0.407	0.108	0.385	0.119	0.144	0.399
WNW	1.860	0.121	2.136	2.169	0.278	2.411	0.185	0.431	2.217
NW	8.217	0.389	8.361	6.736	0.271	8.036	0.712	3.426	7.856
NNW	9.973	0.272	10.075	8.468	0.275	9.941	3.623	6.846	9.679

Tabla V.9 Repartimiento del potencial medio de energía estacional - PRIMAVERA -para un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Dirección	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
N	9.720	0.374	10.861	11.766	0.641	12.034	9.076	11.421	12.468
NNE	1.353	0.878	40.918	4.700	2.808	4.443	6.833	4.785	4.219
NE	0.004	2.230	0.012	0.117	2.710	0.082	0.073	0.058	0.056
ENE	0.001	0.089	-	0.019	0.051	0.020	0.023	0.014	0.014
E	-	0.021	-	0.002	0.018	0.015	0.015	0.016	0.018
ESE	-	0.008	-	0.003	0.011	0.002	1.724	0.008	0.011
SE	-	0.004	-	0.003	0.007	0.010	0.003	0.002	0.013
SSE	-	0.004	-	0.002	0.003	-	0.001	0.001	0.001
S	-	0.006	-	-	0.003	0.002	0.001	0.001	-
SSW	-	0.021	-	0.002	0.027	-	0.011	0.010	0.002
SW	-	0.021	-	-	0.049	-	0.046	0.012	0.013
WSW	0.012	0.021	0.010	0.054	0.061	0.021	0.067	0.044	0.046
W	0.188	0.031	0.222	0.350	0.102	0.274	0.063	0.107	0.316
WNW	1.771	0.125	2.284	2.455	0.258	2.405	0.131	0.346	2.303
NW	7.295	0.413	7.889	7.234	0.305	7.242	0.515	2.899	7.466
NNW	9.912	0.324	10.382	9.276	0.348	9.630	3.261	7.011	9.783

Tabla V.10 Repartimiento del potencial medio de energía estacional – VERANO – para un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Dirección	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
N	6.098	0.136	5.879	5.076	0.155	5.387	3.226	4.918	5.802
NNE	2.644	0.786	3.769	5.938	2.643	5.620	7.160	6.264	6.032
NE	0.003	2.478	0.014	0.197	2.443	0.121	0.062	0.066	0.069
ENE	-	0.010	-	-	0.001	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESE	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SW	-	0.001	-	-	0.001	-	0.001	-	-
WSW	-	0.001	-	-	0.001	-	0.001	0.001	-
W	0.004	0.001	0.003	0.005	0.002	0.004	0.001	0.001	0.005
WNW	0.012	0.005	0.018	0.029	0.007	0.028	0.001	0.001	0.025
NW	0.217	0.061	0.217	0.217	0.019	0.211	0.010	0.068	0.205
NNW	1.721	0.094	1.656	1.019	0.034	1.206	0.158	0.583	1.264

Tabla V.11 Repartimiento del potencial medio de energía estacional – OTOÑO – para un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Dirección	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
N	8.454	0.250	9.071	9.989	0.405	10.142	9.514	10.511	9.313
NNE	1.269	0.541	1.853	3.441	1.811	3.281	4.856	3.627	2.839
NE	0.015	1.616	0.028	0.157	2.205	0.104	0.136	0.085	0.073
ENE	0.010	0.134	0.008	0.034	0.068	0.034	0.052	0.046	0.036
E	0.003	0.037	0.002	0.030	0.046	0.034	0.039	0.037	0.035
ESE	-	0.016	-	0.008	0.016	0.013	0.025	0.021	0.022
SE	0.001	0.008	-	0.002	0.010	0.005	0.010	0.011	0.009
SSE	-	0.005	-	-	0.008	0.002	0.001	0.003	0.009
S	-	0.007	-	0.002	0.007	0.001	-	0.001	0.002
SSW	0.002	0.027	-	0.000	0.029	0.001	0.017	0.012	0.004
SW	0.015	0.020	0.008	0.020	0.058	0.015	0.060	0.030	0.027
WSW	0.043	0.025	0.041	0.066	0.069	0.043	0.080	0.044	0.064
W	0.268	0.036	0.246	0.352	0.076	0.305	0.070	0.113	0.296
WNW	0.805	0.060	0.927	0.976	0.161	0.958	0.118	0.241	0.920
NW	5.846	0.274	5.997	5.812	0.192	5.883	0.512	2.171	5.664
NNW	11.342	0.235	11.071	10.176	0.210	10.376	3.766	5.782	9.565

Tabla V.12 Repartimiento del potencial medio de energía estacional - INVIERNO – para un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Dirección	Punto								
	1024016	1025015	1025017	1025018	1026015	1026018	1027016	1027017	1027018
N	8.914	0.460	9.554	9.949	0.827	12.192	12.025	12.386	11.167
NNE	1.656	0.783	2.170	3.964	2.115	4.556	6.094	4.427	3.865
NE	0.054	1.959	0.119	0.509	2.845	0.481	0.609	0.437	0.380
ENE	0.025	0.432	0.029	0.107	0.330	0.132	0.331	0.185	0.133
E	0.009	0.223	0.469	0.126	0.209	0.155	0.280	0.179	0.172
ESE	0.013	0.116	0.005	0.065	0.121	0.130	0.228	0.168	0.170
SE	0.009	0.046	0.003	0.043	0.046	0.050	0.135	0.081	0.101
SSE	0.007	0.039	0.010	0.015	0.034	0.032	0.117	0.039	0.047
S	0.004	0.047	0.002	0.018	0.043	0.031	0.107	0.034	0.057
SSW	0.011	0.079	0.007	0.039	0.117	0.025	0.165	0.073	0.045
SW	0.064	0.082	0.044	0.092	0.193	0.054	0.260	0.115	0.147
WSW	0.231	0.064	0.221	0.346	0.192	0.274	0.264	0.180	0.349
W	0.741	0.087	0.793	0.920	0.253	0.958	0.344	0.354	0.981
WNW	4.851	0.295	5.315	5.216	0.684	6.254	0.491	1.136	5.621
NW	19.508	0.807	19.343	13.682	0.568	18.808	1.812	8.564	18.087
NNW	16.916	0.436	17.191	13.401	0.509	18.554	7.309	14.008	18.104

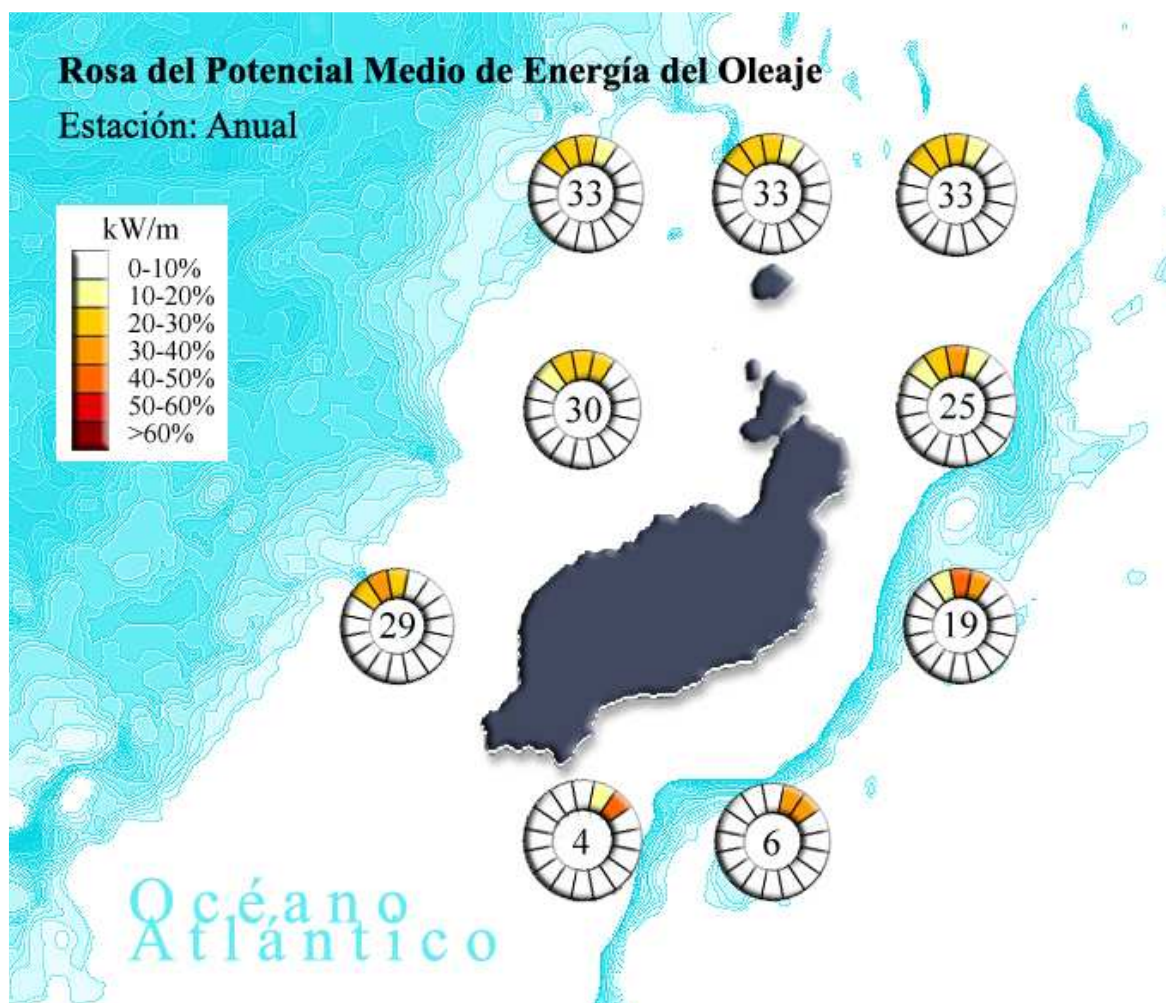


Figura V.15 Potencial medio ANUAL de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

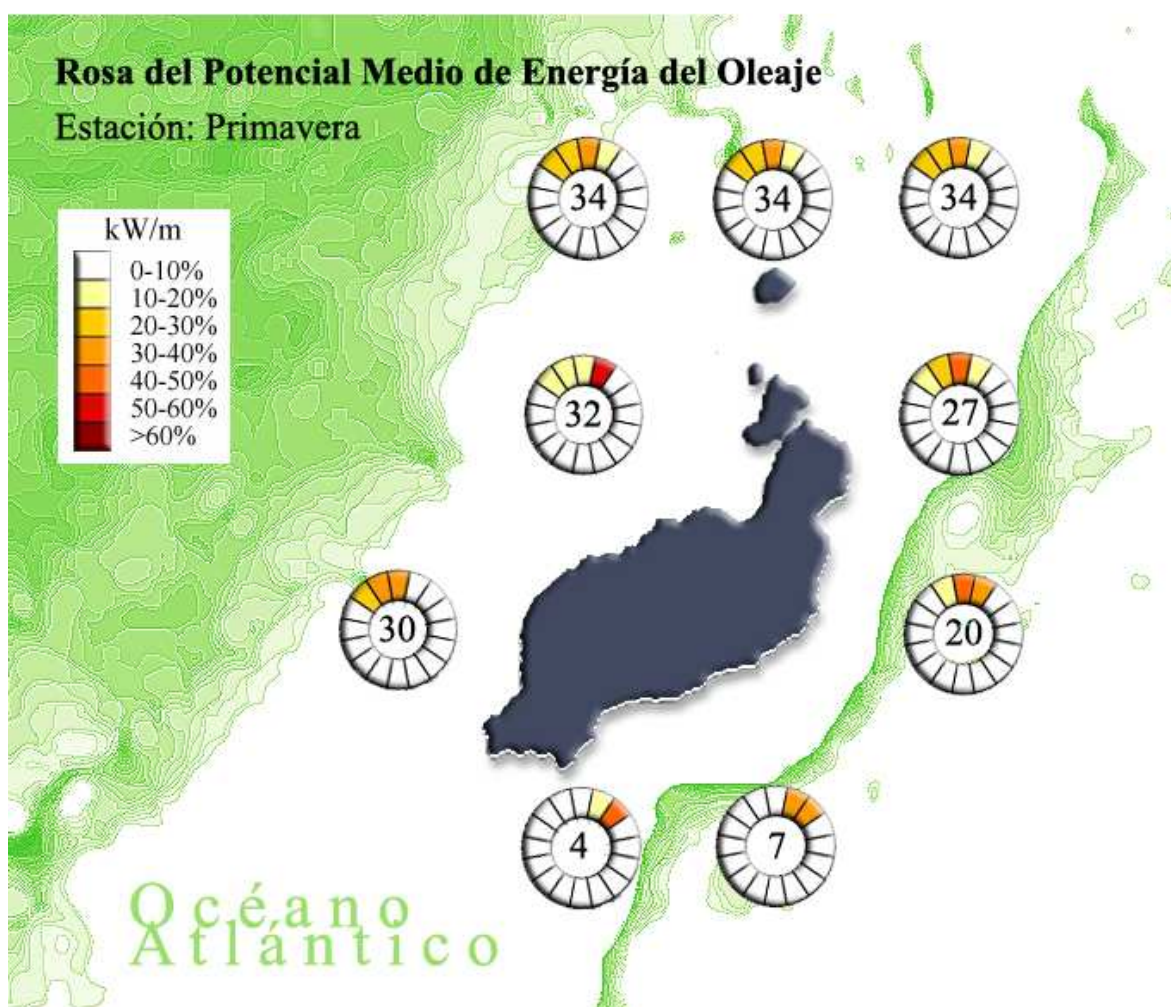


Figura V.16 Potencial medio estacional (PRIMAVERA) de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

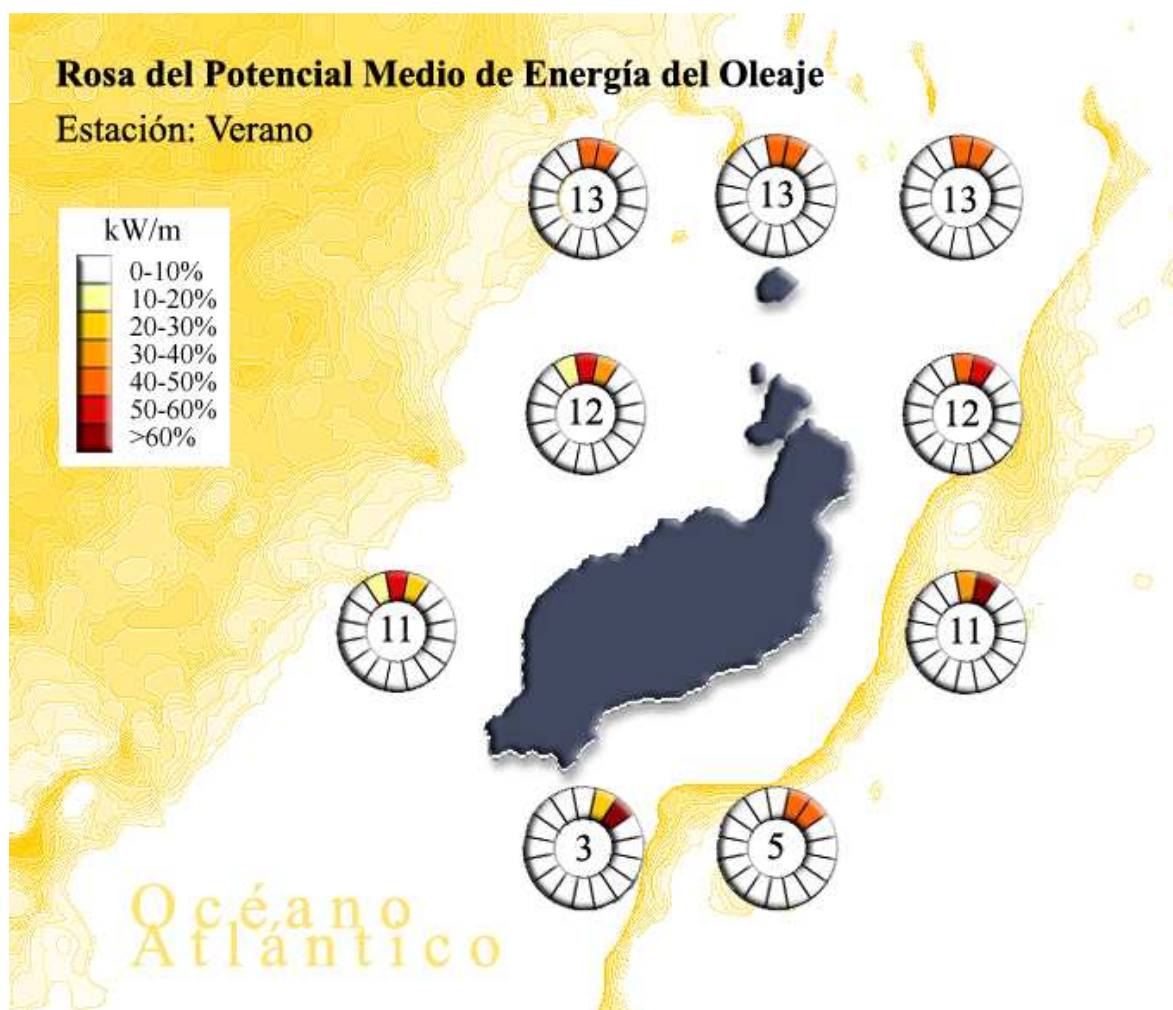


Figura V.17 Potencial medio estacional (VERANO) de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

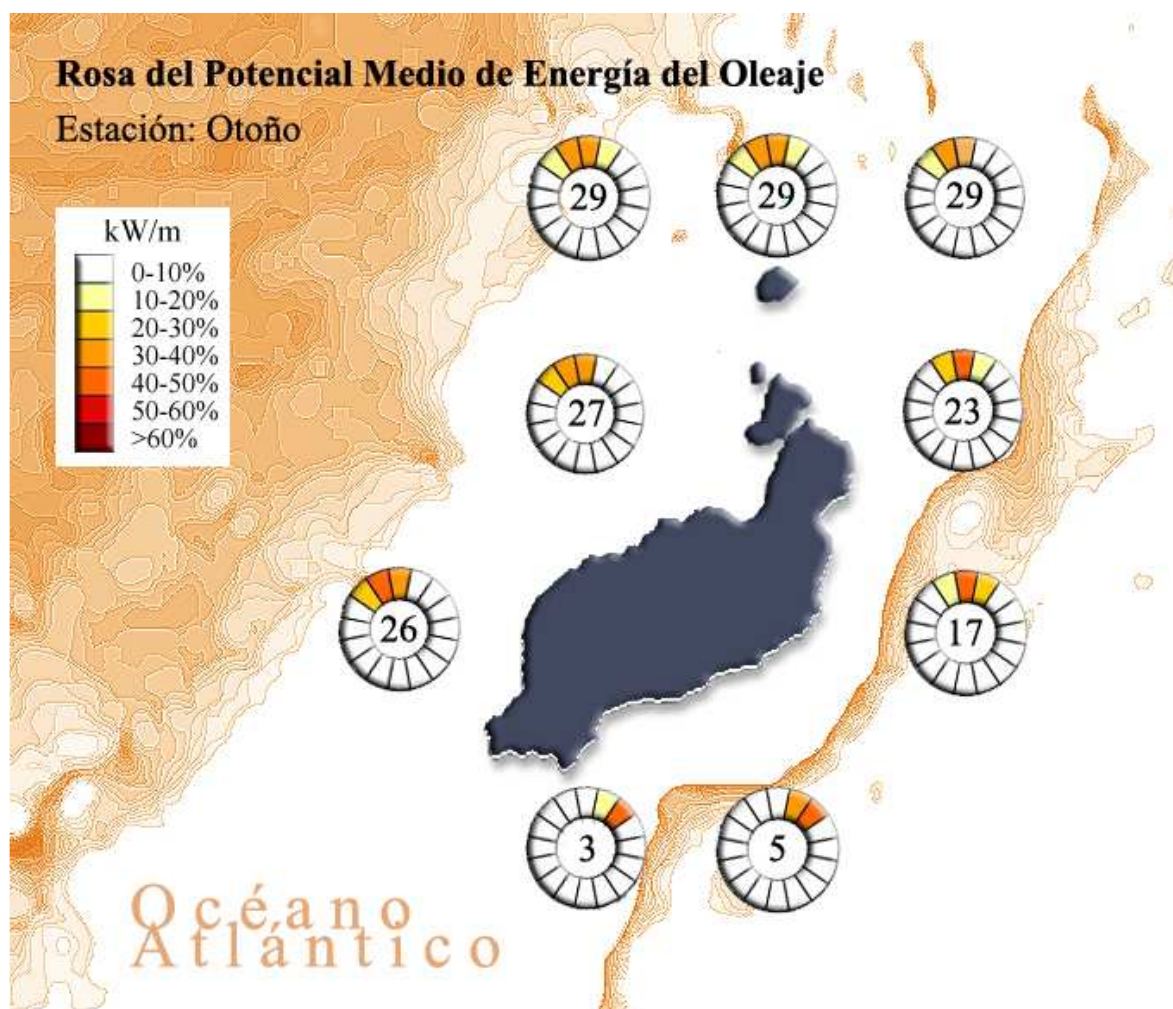


Figura V.18 Potencial medio estacional (OTOÑO) de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

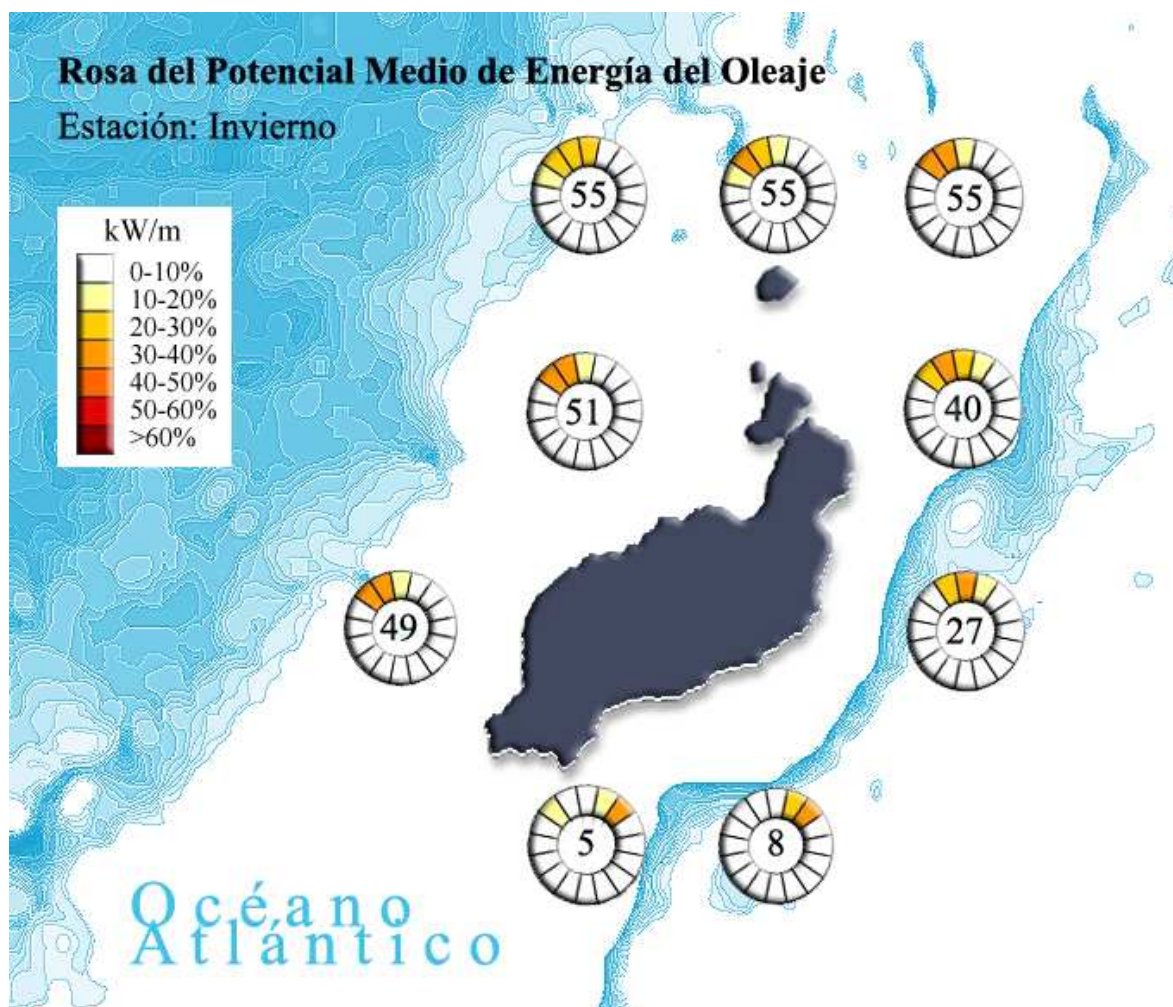


Figura V.19 Potencial medio estacional (INVIERNO) de la energía del oleaje, de un año promedio, entorno a la Isla de Lanzarote.

Capítulo VI

Conclusiones

1. El mar es un gran reservorio de energía aun por explotar.

La génesis de la energía del mar es muy variada, haciendo posible su aprovechamiento de muy diversas formas. Si a esto se le añade el volumen tan importante ocupado por la masa salada, los potenciales disponibles de los recursos pueden alcanzar del orden de hasta 10^6 W.

Sin embargo, existe aun un desconocimiento y falta de sensibilización por parte de la sociedad, científicos y políticos; que han postergado su desarrollo. Es por ello que en la actualidad la tecnología no está enteramente consolidada y las plantas energéticas existentes son prototipos en fase de experimentación.

2. Las energías del mar están concebidas para el desarrollo de tecnologías locales.

La contribución de las energías del mar dentro del contexto global energético es prácticamente despreciable y se prevé que a largo plazo sea muy poco lo que puedan aportar.

Sin embargo esto no ha de ser motivo de su exclusión ya que existen ciertas zonas donde resultan competitivas e incluso las más adecuadas. Este es el caso de las zonas costeras y las islas. Aquí aparece una ventaja muy atractiva de la energía undimotriz que es que los principales asentamientos de la población mundial se encuentran en zonas costeras y por lo tanto, cercanas al recurso; es decir: se trata de un recurso cercano a los consumidores.

3. La energía del oleaje aparece como la más prometedora dentro de las energías marinas.

Si se establece una comparativa entre todas las energías del mar, la energía del oleaje es la que parece ser la más prometedora por disponer de un basto potencial energético aprovechable, además de contar con las ventajas de las anteriores: presenta flexibilidad en sus ubicaciones, permite otras aplicaciones y mediante una buena gestión en su diseño puede reducirse considerablemente su impacto medioambiental.

4. El estado del arte de la energía del oleaje es una realidad divergente.

La tecnología referente al aprovechamiento de la energía del oleaje, ha evolucionado de manera divergente. En la actualidad no existe una línea única de diseño o un prototipo genérico, sino que coexisten una gran variedad de dispositivos que pueden clasificarse atendiendo a una larga lista de criterios, también:

- Según la posición relativa a la costa.
- Según su posición relativa respecto al agua.
- Según su principio de funcionamiento.
- Otros...

Esto se debe a que la eficiencia del diseño final viene condicionada en mayor parte, por el contexto, el cual es heterogéneo.

- La divergencia en el diseño de las instalaciones permite la adaptabilidad al medio sin tener que intervenir en el espacio destinado para la civilización.

Sin embargo, la tendencia futura es conseguir que los nuevos prototipos tengan un denominador común y esto se logra a través de la experiencia. Si se hace un repaso del estado del arte, destacan tres tipologías como aspectos clave a tener en cuenta durante el diseño de cualquier tipo de instalación:

- Ubicación en mar abierto.
- Dispositivos Atenuadores.
- Captación Inercial.

5. Hay que entender la energía del oleaje como un fenómeno variable en el tiempo y en el espacio; y de ahí sus limitaciones.

Consecuencia de ello es que por debajo de cierta amplitud la ola no produciría movimiento ni, por lo tanto, energía. En el otro extremo, si el oleaje es excesivo se podrían dañar los mecanismos.

Estas limitaciones hacen que su aplicación práctica sea bastante dudosa, o por lo menos, limitada a zonas muy específicas donde las condiciones del mar sean bastante estables y adecuadas al sistema.

6. Cuando se estudia el aprovechamiento energético del oleaje en una zona concreta, el primer paso que se recomienda hacer es un análisis de sus disponibilidades.

Este consiste en la evaluación del potencial energético, en diferentes escalas de tiempo y espacio, y en su estudio por direcciones. Para ello se requiere llevar a cabo una serie de tareas ordenadas: recogida de datos que caractericen el oleaje mediante las fuentes de datos disponibles, cálculo del potencial energético y gestión de los resultados.

7. Cuando se define el área de estudio, hay que distinguir entre los puntos base, los puntos objetivo y los puntos óptimos.

Los puntos base corresponden a las longitudes y profundidades de la zona de estudio, de las cuales se tiene información requerida del oleaje mediante las fuentes de datos. Sin embargo, éstos no tienen por qué coincidir con los puntos donde se quiere evaluar el potencial energético del oleaje. Es por eso que se definen también los puntos objetivo, correspondientes a las longitudes y profundidades de las que se quiere obtener información.

Concretamente, los puntos objetivo corresponden a los puntos de partida considerados potenciales para la implantación de la planta energética. De nuevo, a la hora de estudiar su viabilidad, debido a que ésta depende también de otros factores como los económicos, medioambientales...puede que tampoco acaben resultando ser los óptimos.

En cuanto a la localización de los puntos base, se escogen las fuentes de datos de manera que queden contenidas en la plataforma continental de la zona de estudio o lo más cerca posible de ésta, para que los datos del oleaje que facilitan sean representativos.

8. Para la obtención de datos de oleaje, y siempre que sea posible, lo más adecuado puede ser recurrir a fuentes de retroanálisis.

Para la evaluación del potencial energético en la zona de estudio, interesa disponer de series temporales de datos lo más largas posibles y que no alberguen huecos. De esta manera se puede trabajar con valores promedios suficientemente representativos, y estudiar la variabilidad del fenómeno a diferentes escalas temporales.

Dicha evaluación incluye también el estudio de cómo queda repartido el potencial medio en las diferentes direcciones, para tener conocimiento y poder trabajar con las que estén más solicitadas.

Ante esto, los datos de retroanálisis pertenecen a periodos de tiempo muy superiores al de los datos instrumentales y no contienen los huecos derivados de los fallos de los equipos de medida. A diferencia de las boyas escalares, facilitan datos direccionales de temporales.

Existe el inconveniente de que los datos de retroanálisis han de calibrarse mediante datos instrumentales, por resultar aparatoso (trabajo añadido) o dificultoso (que no se disponga de datos instrumentales para la calibración). Sin embargo, en este caso se suele trabajar con valores promediados, y por lo tanto no hace falta la calibración de los datos.

Finalmente, las formulaciones para el cálculo del potencial energético del oleaje están deducidas para el dominio de aguas profundas. En el caso de España, la red de boyas de aguas profundas dispone de un número mucho más reducido de localizaciones que los puntos WANA, por lo que según donde se encuentre la zona de estudio, puede que no se disponga de datos instrumentales.

9. Para el cálculo del potencial energético, lo más adecuado es recurrir a la descripción espectral del oleaje.

La descripción espectral del oleaje supone éste como un fenómeno irregular (a diferencia de las teorías en el oleaje regular) y continuo (a diferencia de la descripción geométrico-estadística del oleaje).

La realidad es que el oleaje, y en consecuencia su energía, son un fenómeno complejo y aleatorio. Por lo que los modelos espectrales son los que describen con mayor precisión, su comportamiento real.

Para el dominio de aguas profundas, el potencial medio de energía se puede calcular a partir de las expresiones:

$$\bar{P} = \alpha \cdot H_s^2 T_z [kW / m] \quad \text{con} \quad \alpha \in [0.4, 0.6]$$

$$\bar{P} = \beta \cdot H_s^2 T_p [kW / m] \quad \text{con} \quad \beta \in [0.41, 0.43]$$

$$\bar{P} = \gamma \cdot H_s^2 T_e [kW / m] \quad \text{con} \quad \gamma = 0.493$$

Donde:

α B Constante dependiente del tipo de espectro de energía (Pierson-Moskowitz, Jonswap...).

H_s T_z T_p Se obtienen a partir de las fuentes de datos.

T_E No se determina mediante las medidas directas del oleaje, sino que se calcula a partir de diferentes expresiones, dependientes también del tipo de espectro de energía, que lo relacionan con las medidas de los periodos anteriores.

10. La gestión de los resultados viene condicionada por las fuentes de datos utilizadas (o el tipo de parámetros de oleaje facilitados).

En función del tipo de fuentes de datos disponibles, se obtendrá una información concreta, que permitirá estudiar, con menor o mayor rigor, el fenómeno de la energía del oleaje en una zona concreta.

La representación de los resultados suele hacerse de manera gráfica, por facilitar su lectura. La elección de la descripción gráfica depende de las variables con las que se trabaja y del fenómeno que se quiere representar.

El caso ideal es poder disponer de medidas escalares y direccionales del oleaje, que pertenezcan a una serie temporal de larga duración, y que las medidas sean tomadas en el mayor número de puntos base posibles (comprendidos dentro de la zona de estudio).

Entonces, la manera gráfica que aparece como la más adecuada, son los mapas de rosas de energía. Estos representan la intensidad de energía alcanzada en cada una de las direcciones y en cada uno de los puntos evaluados, permitiendo visualizar el fenómeno de estudio en su contexto.

11. Se ha construido un Atlas Energético de Oleaje en toda la costa de la Isla de Lanzarote, evaluando los recursos energéticos en nueve puntos diferentes.

Como aplicación de esta tesina se ha realizado un análisis de las disponibilidades energéticas del oleaje de la Isla de Lanzarote durante los últimos cincuenta años.

Se ha evaluado el potencial y la dirección medios de energía, anual y estacional, en nueve puntos localizados alrededor de la Isla.

Los datos del oleaje pertenecen a las fuentes de datos del oleaje: WANA y SIMAR, y han sido facilitados por el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC.

El valor del potencial medio de energía está cercano a 26 kW/m y se distribuye anualmente de la siguiente manera:

- Potencial medio de energía en primavera de 30.25 kW/m.
- Potencial medio de energía en verano de 10.23 kW/m.
- Potencial medio de energía en otoño de 22.12 kW/m.
- Potencial medio de energía en invierno de 40.76 kW/m.

12. Teniendo en cuenta los potenciales disponibles europeos, la Isla de Lanzarote aparece como candidata para el aprovechamiento de la energía del oleaje para producir electricidad.

Capítulo VII

Referencias bibliográficas

Acuña, H. y Monández, P. (2007), *Evaluación del potencial de la energía del oleaje en Chile*. XVIII Congreso Chileno de Hidráulica. Sociedad chilena de Ingeniería Hidráulica.

Agencia Internacional de la Energía (IEA). Disponible en: <http://www.iea.org>

Anaconda. Disponible en: <http://www.checkmateuk.com/seaenergy/>

Arquímedes. Disponible en: <http://www.awsocan.com/>

CEM (2002), Coastal Engineering Manual. U.S.Army Corps of Engineers.

Centre for Renewable Energy Sources (2004), *Ocean energy conversion in Europe. Recent advancements and prospects*. In coordinated action on Ocean Energy, Proyecto de la Unión Europea, Renewable Energy Technologies.

Cifuentes, J.L. (1991), *El océano y sus recursos I: Panorama Oceánico*. 1ª ed. México. La Ciencia desde México, 1986. ISBN: 968-16-2389-4

Clément, A. *et al.* (2002), *Wave energy in Europe: current status and perspectives*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Nº 6, pag. 405-431.

European Marine Energy Centre. Disponible en: <http://www.emec.org.uk/>

European Ocean Energy Association. Disponible en: <http://www.eu-oea.com>

Fernández, J. (2008), *Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad*. Tesina de especialidad ETSII-UPM.

Folley, M. (2006a), *Estado del arte de las tecnologías de aprovechamiento de energía del oleaje*. I Jornadas Técnicas Sobre Aprovechamiento de las Energías Renovables en Mares Archipelágicos, 23 y 24 de Noviembre de 2006, S.C.Tenerife

Folley, M. (2006b), *Evaluación de recursos y potencialidades de la Energía del Oleaje*. I Jornadas Técnicas Sobre Aprovechamiento de las Energías Renovables en Mares Archipelágicos, 23 y 24 de Noviembre de 2006, S.C.Tenerife.

García, A. y de la Villa, A. (2007), *Energía undimotriz*. Ingeniería energética y medioambiental, Año nº 33, Nº 201, pag. 72-80.

GCEP (2006) Global Climate and Energy Project. Stanford University.

Global Energy Network Institut. Disponible en: <http://geni.org>

Google Earth. Disponible en: <http://earth.google.es>

Guix, M.R. (2006), *L'onatge com a font d'energia en el Mediterrani català*. Tesina d'especialitat. Departament d'Enginyeria Hidráulica, Marítima i Ambiental, ETSECCPB, UPC-

Hagerman, G. (2001), *Southern New England wave energy resource potential*. Center for Energy and the Global Environment. Virginia Tech Alexandria Research Institut.

Herman, W. (2005), Quantifying global exergy resources. Global Climate and Energy Project, 556Q Peterson Laboratory, Stanford University.

Ibáñez, P. (2008), *Energías de las olas: situación y futuro*. Xornada sobre Energía que Vén do Mar, 1 de Julio de 2008, A Coruña.

Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. (2007), *Identificación y caracterización del potencial de la energía de las olas en Canarias*. Proyecto: ERAMAC, Módulo A, tarea A3.

Martínez-Val, J.M. (2006), *La energía en el horizonte*. Asociación de Ingenieros Industriales de Madrid, Vol.10, pag. 6-10.

Legaz, R. (2006), *Desarrollo de una planta de energía de las olas en Santoña*. I Jornadas Técnicas Sobre Aprovechamiento de las Energías Renovables en Mares Archipelágicos, 23 y 24 de Noviembre de 2006. S.C.Tenerife.

Llanos, A. (2006), Proyecto Europeo Wavenergy. I Jornadas Técnicas Sobre Aprovechamiento de las Energías Renovables en Mares Archipelágicos, 23 y 24 de Noviembre de 2006. S.C.Tenerife.

Mc. Cormick, M.E. (1981), *Ocean Wave Energy Conversion*. Wiley. Interscience.

Mighty Whale. Disponible en: www.marinetalk.com/

Pelamis. Disponible en: <http://www.pelamiswave.com/>

Perdomo, A. (2008), El mundo, Ciencia y Ecología, 21 de abril de 2008.

Petroni, R.V. (2005), *Hidráulica Marítima y de Estuarios*. 3º ed. Buenos Aires, AR. Dunken. ISBN: 987-02-1142-9.

Pico. Disponible en: www.pico-owc.net

Power Bouy. Disponible en: www.oceanpowertechnologies.com/

Ruiz, J.P. (2007), *Aprovechamiento de la energía de las olas*. 2ª Jornada Internacional sobre Energía Marina, 25 de Enero de 2007, Bilbao Exhibition Centre (Bec), Barakaldo.

Tomás, A. et al. (2004), *Bases de datos de oleaje y nivel del mar, calibración y análisis: el cambio climático en la dinámica marina en España*. Universidad de Cantabria.

Vidal, C. (1986a), *Historia, clasificación y selección de los generadores de energía del oleaje*. Revista de Obras Públicas, pag. 675-689.

Vidal, C. (1986b), *Análisis de la energía del oleaje en las costas españolas*. Revista de Obras Públicas, pag. 95-108.

Vidal, C. (2006), *Evaluación del flujo de energía del oleaje: aplicación a la costa del País Vasco*. I Jornadas Técnicas Sobre Aprovechamiento de las Energías Renovables en Mares Archipelágicos, 23 y 24 de Noviembre de 2006. S.C.Tenerife.

Villate, J.L. (2008), *Las energías del mar*. Física y sociedad. Revista del Colegio Oficial de Físicos. Nº 18, pag. 38-41.

Proyecto Wavenergy. Disponible en: <http://www.wavenergy.es/cms>

Wave Dragon. Disponible en: <http://www.wavedragon.net>.

Otra bibliografía consultada:

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas del Ministerio de Ciencia e Innovación: <http://www.ciemat.es/>

Corporación Tecnológica Tecnalía. Disponible en: <http://www.tecnalia.info/>

González, M. I Liria, P. (2007), *Energía marina y sus posibilidades a nivel mundial. Disponibilidad de recursos y posibilidades de la Costa Vasca*. 2ª Jornada Internacional sobre Energía Marina, 25 de Enero de 2007, Bilbao Exhibition Centre (Bec), Barakaldo.

Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S.A. (2007), *Estudio del estado del arte en cuanto a sistemas de generación undimotriz existentes*. Proyecto: Plan de desarrollo regional para el uso de la energía proveniente del oleaje atlántico.

Ocean Energy Systems. Disponible en: <http://www.iea-oceans.org>

Ocean Power Technologies. Disponible en: <http://www.oceanpowertechnologies.com>.

Research Institut for Sustainable Energy: Disponible en: <http://www.rise.org.au>

Robotiker Tecnalía. Disponible en: <http://www.robotiker.com>

Tecnalia: Disponible en: <http://www.tecnalia.info>

Thorpe, T.W. (1999), *A Brief Review of Wave Energy*. ETSU Report R-122, prepared for the United Kingdom Department of Trade and Industry.